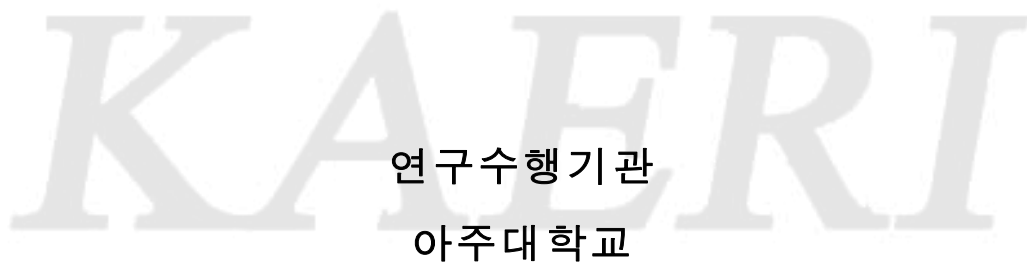


KAERI/CM-1093/2008

연구용 원자로 해외진출 전략 연구

Study on the Export Strategies for Research Reactors



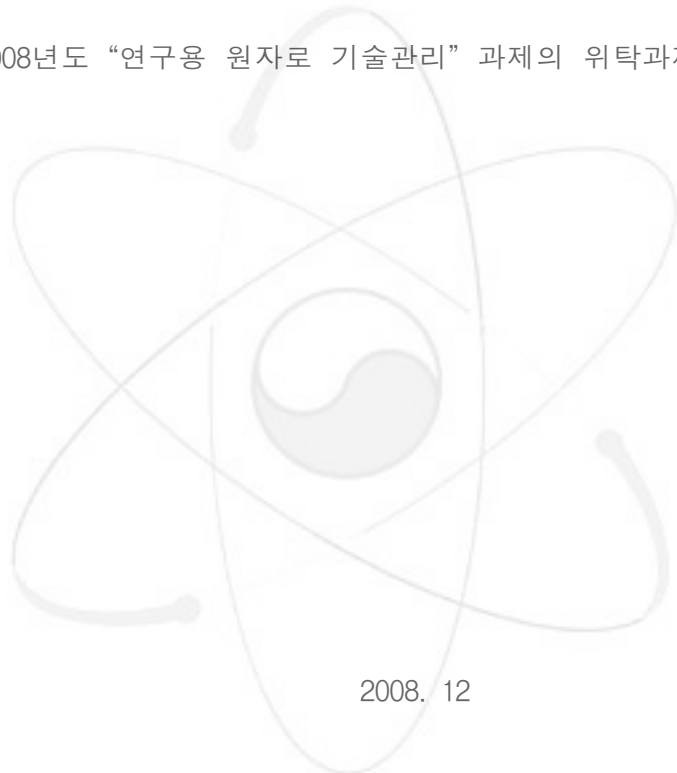
연구수행기관
아주대학교

한국원자력연구원

제 출 문

한 국 원 자 력 연 구 원 장 귀 하

본 보고서를 2008년도 “연구용 원자로 기술관리” 과제의 위탁과제 최종보고서로 제출합니다.



2008. 12

과제명: 연구용 원자로 해외진출 전략 연구

연구수행기관명: 아주대학교

연구책임자: 오 세 기

연구원: 이 영 준

연구원: 함 태 규

연구원: 홍 성 택

연구원: 김 종 훈

요 약 문

국내외적 환경이 원자력산업의 새로운 전기를 마련하는 방향으로 나아가고 있다. 여기서 국내 연구용 원자로 기술이 갖는 취약점을 보완 및 개선하고, 연구용 원자로 수출요소를 재평가하여 수출사업화 방안을 모색하고, 수출전략을 수립하고 실행 시나리오를 제시하는 목적으로 연구를 수행하였다.

연구용 원자로 수출전략 고려사항은 시대에 맞는 연구용 원자로의 역할과 함께 수요와 공급의 균형 관점에서 노형과 용량이 평가되므로 세계 잠재 수요국들을 원자력선진국, 중진국, 개발도상국의 3등급으로 구분하고 등급별 표준 모델의 기본 사양을 개발하고, 이를 바탕으로 실제수요자가 주문하는 요구사항을 공동연구를 통해 확정하여 반영하는 접근방법이 효과적일 것이라는 점이다. 이르기 위해서 사업개발 초기부터 사업 및 기술관리 종합체계를 수립하므로 일관된 사업추진 동력을 제공하고, 수요자의 경제여건, 기술능력, 인력수준 등을 고려한 설계요구사항을 효과적으로 수립하는 맞춤형설계전략을 사용하는 것이 중요하다.

맞춤설계전략을 효율적으로 구현하는 방법으로서 수요자요건을 설계요건으로 변환시킴에 있어 설계에서 건설, 운영 및 폐로에 이르기까지의 기술수명동안 추적성을 최대로 관리하는 체계공학방법을 도입할 것을 제안하였으며, 요건관리 실행기법으로 QFD(Quality Function Deployment)의 template를 개발하고, 사업기획단계에서부터 이의 효과적 적용을 위한 사업조직을 제안하였다.

비록 연구용 원자로 수출사업을 착수하는데 필요한 모든 준비가 완벽하게 되었어도 궁극적으로는 수요자의 구매동기를 환기시키기 위한 의사교류의 문을 여는 것이 중요하다. 본 연구에서는 수요자 친화 및 관리전략으로 수요자의 사업주도 의사가 확고한 경우의 수동적인 방법, 수요자와 협력을 중요시하는 능동적인 방법, 그리고 수요자의 요구조건이 거의 없는 경우의 선도적 방법을 선별적으로 적용하도록 권고하면서 각 방법의 특징을 서술하였다.

추가적으로 연구용 원자로시장의 특수성을 고려한다면, 사업개발 초기에는 원자력 분야에 특화된 국가지원 연구기관이 사업을 선도하므로 실수요자인 상대국 원자력 연구기관과의 동질성을 바탕으로 신뢰구축이 용이하고, 사업성이 가시적인 경제성보다 국제기술외교 같은 공익성이 중요하므로 국가기관의 적극적인 관심과 지원이 사업성공에 필수적이라는 점을 강조한다.

S U M M A R Y

Nuclear industries in both our nation and the world are likely to strive for a new horizon, 'Nuclear Renaissance'. At this moment, it is timely appropriate to investigate the strengths and weaknesses of the research reactor technology facets of the nation, and to evaluate their potential compatibility in the international research reactor markets. Based on the findings, this study seeks strategies of enhancing the export opportunity for research reactors and their implementing scenarios for success of business.

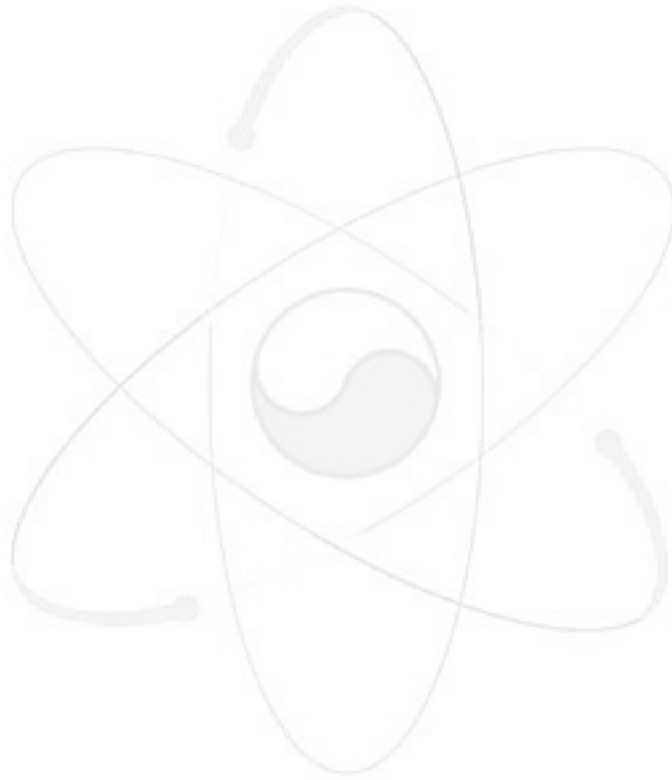
Key strategic considerations taken into account should be based on understanding in the forecasts of demand and supply balance as well as the missions of research reactor for customers. For timely arrival at the competition, it may be advantageous to categorize the potential customers into 3 groups, the developed, the developing and the underdeveloped countries in respect of nuclear technology, and to be ready for the group-wise reference designs of the key reactor systems. Customizing the design to specific owner's requirements can advance from one of these reference designs when competition starts. To mobilize this approach effectively, it is useful to establish an integral project and technology management system earlier. This system will function as an important success factor for international research reactor business, because it makes easy to accommodate customer requirements and to achieve the design-to-cost.

For practising customized design processes, it is also proposed to introduce the systems engineering methods to ensure the traceability of the design requirements through the life-cycle of the reactor system from design to decommissioning. In the course of managing the customer's requirements, templates of the Quality Function Deployment, QFD need to be developed and introduced as early as the beginning of the project.

However, no matter how well all the necessary measures for operating projects are established, the project cannot gain momentum, if not succeed in attracting customer's decisions. To adhere, therefore, customer's confidence to the project, it is advised to select one of three contract options, the passive, the active and the leading approaches, depending on his or her experiences in the research reactor technology. The passive one is appropriate for advanced countries, the active one for developing countries, and the leading one for underdeveloped countries.

In addition to the above, because the research reactor projects are usually

supported by their own governments, intergovernmental relationship is an important element for positive influence to sell the reactor. Therefore, supports from Korean government in areas of international technology diploma should be accompanied by profitable commercial negotiation.

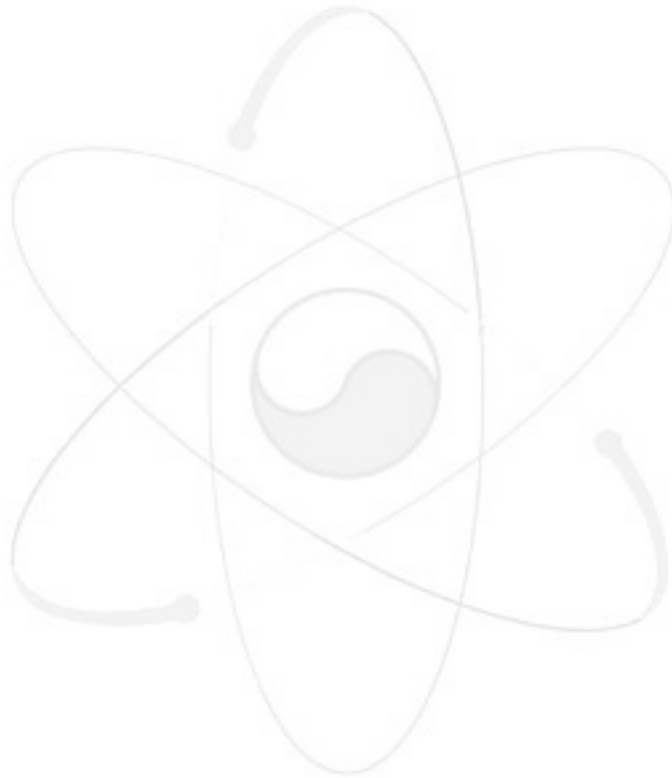


<CONTENTS>

I	Introduction	1
I.1	Background	1
I.2	Objectives and Necessities of the Study	2
I.2.1	Objectives	2
I.2.2	Necessities	2
II	Scope of Works	4
II.1	Assessment of Current Research Reactor Technology	4
II.1.1	Status of World Research Reactors	4
II.1.2	Status of R&D for Research Reactors	11
II.1.3	Status of World Research Reactor Markets	13
II.1.4	Progresses in National R&D for Research Reactors	14
II.2	Marketing Strategies for Research Reactors Export	20
II.2.1	Scope of World Research Reactor Business	20
II.2.2	Options for International Research Reactor Projects	22
II.2.3	Exportability Enhancements via Reinforcing Present Capability	23
II.2.4	Strategic Attributes for Exporting Research Reactors	25
II.3	Approaches to Customer-Friendly Environment	33
II.3.1	Implementation Plan of Strategic Attributes for Export	33
II.3.2	Organization and Functions of the Business Development Unit	36
II.3.3	R&D in Phase I (Feasibility) Study	38
II.3.4	QFD Matrix for Developing Reactor Concept Requirements from Customer Requirements	41
II.3.5	QFD Matrix for Developing Reactor System Design Requirements from Reactor Concept Requirements	45
II.3.6	Documentations for the Phase I Study Outcomes	48
II.3.7	Strategic Scenario Options for Customer-Friendliness	50
II.3.8	Preparation for Phase II (Conceptual Design) Study	53
III	Conclusion and Recommendations	55
	References	58
	Appendix I	59
	Appendix II	85
	Appendix III	87

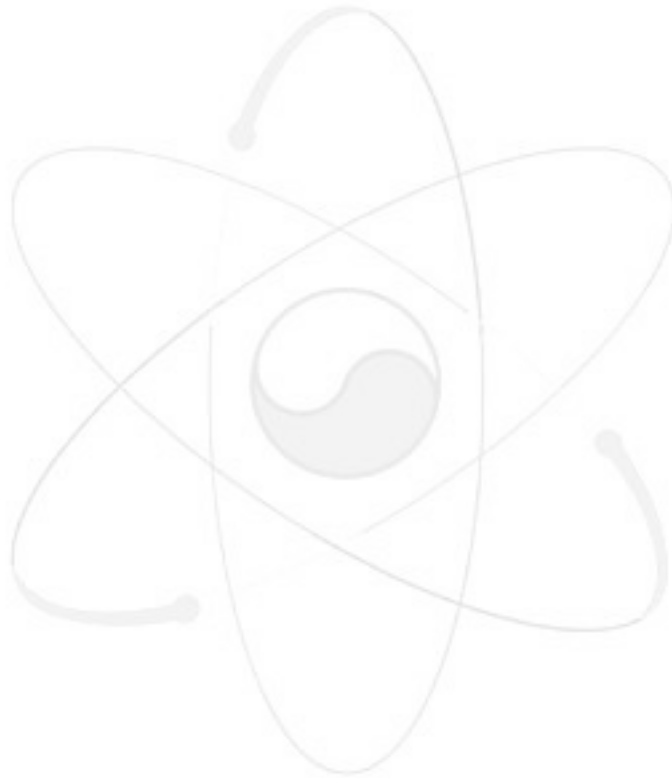
<LIST OF TABLES>

[Table 1] Status of World Research Reactors	5
[Table 2] Comparison of Computer Codes Used in Research Reactor Design	19
[Table 3] Exportable Products and Their Values for International Research Reactor Business	22



<LIST OF FIGURES>

[Figure 1]	Annual Statistics of Operating Research Reactors in the World	4
[Figure 2]	Age Distribution of Research Reactors under Operation	4
[Figure 3]	Sample of Quality Function Distribution Matrix	34
[Figure 4]	Proposed Business Unit for Planning of Research Reactor Export	38

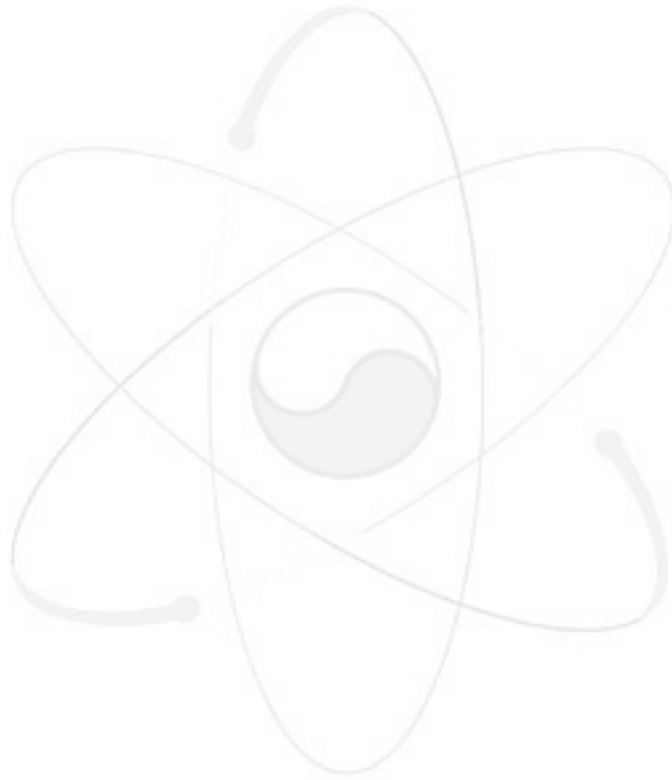


<제목 차례>

제 1 장 서론	1
제 1 절 배경	1
제 2 절 개발 목적 및 필요성	2
1. 연구개발 목적	2
2. 연구개발 필요성	2
제 2 장 연구개발 내용	4
제 1 절 연구용 원자로 기술 현황 분석	4
1. 세계 연구용 원자로 현황	4
2. 연구용 원자로 기술개발 현황	11
3. 연구용 원자로 수출시장 현황	13
4. 국내 연구용 원자로 개발 현황	14
제 2 절 연구용 원자로 시장 진입전략 수립	20
1. 연구용 원자로 수출사업 범위	20
2. 연구용 원자로 수출상품 옵션	22
3. 취약 및 보완 사항에 대한 개선 방안	23
4. 연구용 원자로 수출 전략요소	25
제 3 절 대상국가 접근 및 개발 전략	33
1. 수출 전략요소의 구현	33
2. 사업개발 조직 및 기능	36
3. Phase I (타당성) 연구개발	38
4. 수요자 요건에 대응하는 설계개념 요건 개발 QFD	41
5. 개념설계 요건으로부터 계통 설계개념 개발 QFD	45
6. Phase I (타당성연구) 보고서 작성	48
7. 수요자 친화 및 관리 전략 시나리오 옵션	50
8. Phase II (공동개념설계) 개발 준비	53
제 3 장 결론 및 권고사항	55
참고자료	58
부록 1. 세계 연구용 원자로 현황	59
부록 2 세계 발전로 현황	85
부록 3. 핵비확산 관련 정책 및 제도	87

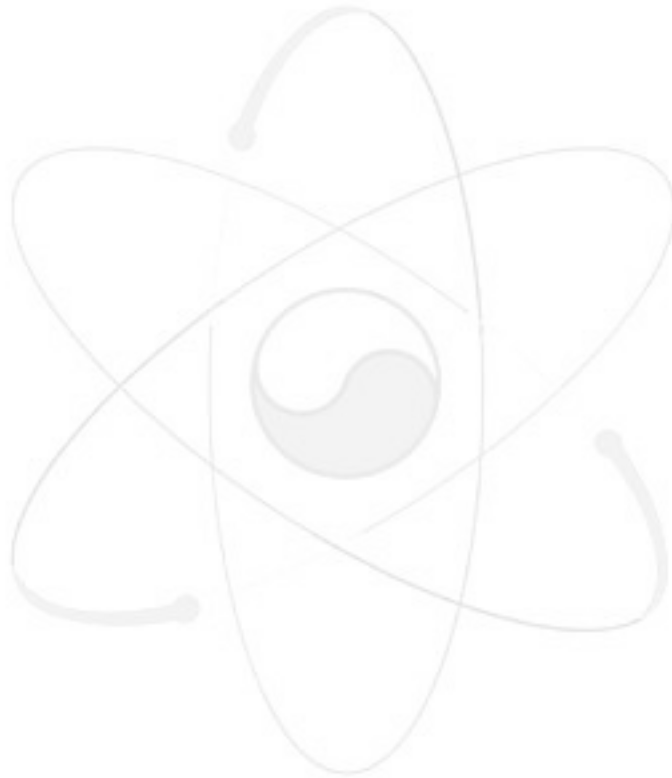
<표 차례>

[표 1] 세계 연구용 원자로 현황*	5
[표 2] 연구용 원자로 설계용 컴퓨터 코드체계 비교	19
[표 3] 연구용 원자로 제품 국내 현황 및 수출 예상 금액	22



<그림 차례>

[그림 1] 년도별 가동 중인 연구용 원자로 수의 변화	4
[그림 2] 가동 중인 연구용 원자로의 연령 분포	4
[그림 3] Quality Function Deployment 도표 예	34
[그림 4] 연구용 원자로사업 추진을 위한 사업개발 조직	38



제 1 장 서 론

제 1 절 배경

1950년대 초 이후 원자력의 평화적 이용에 대한 국제사회의 관심이 높아짐에 따라 연구용원자로를 이용한 원자력연구 및 기술개발은 지금까지 과학 발전과 인류 복지에 많은 기여를 해왔지만 1970년대 후반부터 원자력발전산업의 급격한 위축과 더불어 이를 둘러싼 원자력기술개발의 중요성에 비해 투자의 필요성이 상대적으로 덜 강조되고 있다. 그 동안 세계적으로 원자력 안전에 대한 규제가 강화되고, 방사선에 대한 불안감에 따른 지역 주민과 국민 이해를 구하기가 점차 어려워지는 점, 발전용 원자로 개발 수요가 많이 감소한 점, 그리고 기술적으로는 양성자가속기로 연구용 원자로의 기능을 대체하려는 경향 등으로 점차 연구용 원자로 건조를 위한 사업 환경이 밝지 않았다.

이와 같이 원자로에 대한 기대가 상대적으로 줄어들었음에도 불구하고, 지난 반세기 동안에 과학기술의 발전과 복지문명의 윤택에 많은 기여를 해왔으며, 관련 연구개발 및 활용분야의 인프라가 상당히 구축되어 있다는 점, 새로운 이용분야가 계속 확대되고 그 이용 분야가 최근 유행하고 있는 나노, 생명공학 및 환경기술 개발의 필수 및 요소 기술 개발과도 연계되어 있는 점, 연구용 원자로를 대신할 만한 경제적이고 안정적인 중성자원의 개발 및 대체까지는 오랜 시간이 소요되는 점 등을 고려할 때 향후에도 상당 기간 연구용 원자로의 역할은 유지될 것으로 예상된다.

현재 기술 선진국들은 기존의 연구용 원자로 설비를 보강 및 개선, 수명 연장을 통하여 연구용 원자로가 수행해 온 역할을 지속하면서 대형 양성자가속기를 이용하는 대체 중성자원 개발에 관심을 두고 있는 경향이고, 상대적으로 기술 선진국들은 경제적 및 기술적인 면과 자국의 환경을 고려하여 다목적으로 사용할 수 있는 연구용 원자로의 건설을 고려하는 것으로 생각된다. 특별히 고준위폐기물에 포함된 장수명 핵종의 핵변환 및 소멸처리에 효과적인 고에너지 중성자를 생산 가능한 대형 양성자가속기를 미국과 일본은 2008년 가동을 목표로 건설 중에 있고, 유럽연합은 건설을 계획하고 있다. 그러나 이들 대체 중성자원도 연구용 원자로와 상호보완적으로 활용하므로 가치를 극대화할 수 있으며, 또한 사업이 확정되기 까지는 비용 등 장단점 비교에는 상당 기간이 소요될 것으로 추정된다.

제 2 절 개발 목적 및 필요성

1. 연구개발 목적

과거의 경험에 비추어 볼 때, 원자력 르네상스가 도래한다면 원자력 기술개발에 핵심적인 연구시설로서 연구용 원자로의 필요성이 증가할 것이 확실하다. 본 연구는 이러한 환경변화에 부합하는 연구용 원자로 기술의 해외진출을 위한 전략을 체계적으로 수립하기 위해 주요 국가들을 대상으로 연구용 원자로의 도입 목적, 활용분야, 적용기술 및 특성 등 다양한 수요자 요건을 종합적으로 분석하고 최적의 대책을 강구하는 체계공학적 방법을 개발하는데 연구의 목적이 있다.

이러한 목적 아래 진행되어온 본 연구는 먼저 세계 각국에서 보유 및 가동 중인 연구용 원자로의 기술적 특징과 활용 연구 분야의 현황을 점검하고, 예상되는 미래 활용성을 고려하여 취약 혹은 보완 사항을 조사, 분석하고 이로부터 개선 방안을 도출하므로 세계 연구용 원자로시장에 효율적으로 진입할 수 있는 전략을 수립하는 것을 내용으로 한다.

2. 연구개발 필요성

국내 원자력기술은 1980년대 중반부터 공동개발 또는 기술이전 등 다양한 방법을 통한 원자력기술 자립정책의 지속적이고 일관된 추진으로 현재 세계적 수준에 이르게 되었다. 이 가운데 대표적인 성과중 하나로서 하나로의 자력 설계, 건설 및 운전 경험을 통해 축적된 연구용 원자로 기술을 들 수 있다.

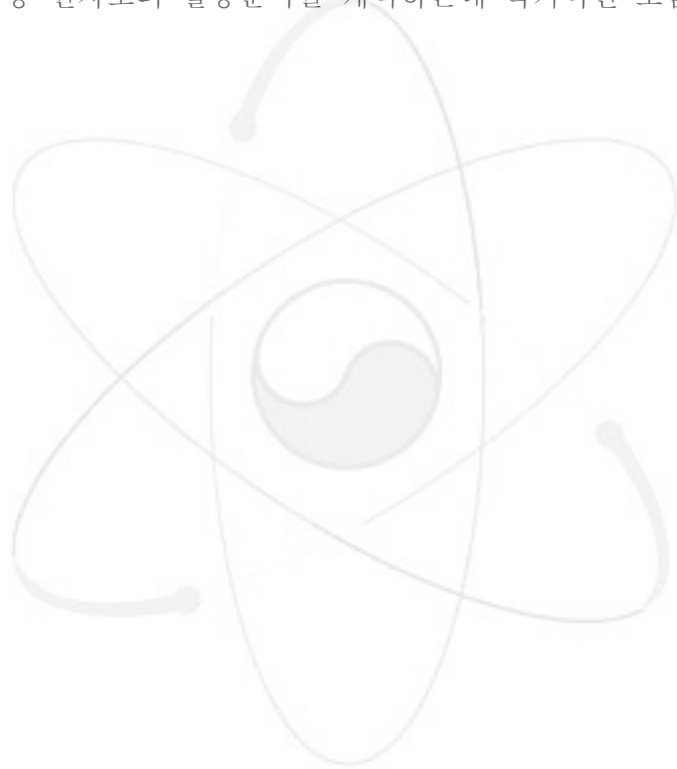
반면에 연구용 원자로의 개발 및 이용은 원자력 발전사업의 성장 및 수요와 긴밀한 관계가 있어서 현재 세계 각국이 보유하고 있는 연구용 원자로는 거의 전부가 노화 및 활용성에 한계에 도달한 상태이다. 그러나 기후온난화, 석유시장의 불안 등 국내외적 여건이 원자력에너지의 새로운 역할을 요구함에 따라서 연구용 원자로의 수요환경 변화가 기대됨과 동시에 연구용 원자로 시장의 활성화 징조가 곳곳에서 감지된다.

따라서 세계 원자력계는 핵확산 우려, 고준위폐기물 누적, 궁극적 안전성의 한계, 우라늄자원의 고갈, 등 기존의 경수로 기반 상용원전이 안고 있는 고유한 문제점을 극복하려는 목적으로 제4세대 원자력에너지시스템 개발에 착수하게 되었고, 더불어 관련된 핵심기술 분야의 재료개발 및 실증실험이 불가피하게 되었다.

그러므로 이러한 세계 선도의 기술능력을 수출형 연구용 원자로 개발에 활용할 수 있다면, 원자력기술 및 플랜트 수출 뿐 아니라 원자력을 국제 외교의 전략

카드로 활용할 수도 있고, 또한 기술지원을 통한 발전로 수출 교두보 확보와 같은 다각적인 효과를 얻을 수 있을 것이다.

비록 하나로사업이 성공적인 원자력기술 개발사업 중 하나지만 1980년대 기술에 기반을 두고 있으며, 그 이후 새로운 연구용 원자로 개발사업이 계획되지 않았기 때문에 지속적인 기술발전을 이루지 못했다. 따라서 새로운 수출용 연구용 원자로 개발은 그 동안의 국내 연구용 원자로 건조 및 활용기술의 현황을 평가하고 미래 비전에 대한 재조명 기회를 가져다줄 수 있을 것을 기대한다. 특별히 2000년대에 들어서면서 획기적인 발전을 거듭하고 있는 IT기술을 접목할 경우, 설계, 건설, 운전, 이용 등 모든 분야에서 기술 수준의 향상을 촉진할 뿐만 아니라 새로운 연구용 원자로의 활용분야를 개척하는데 획기적인 도움을 줄 것이다.



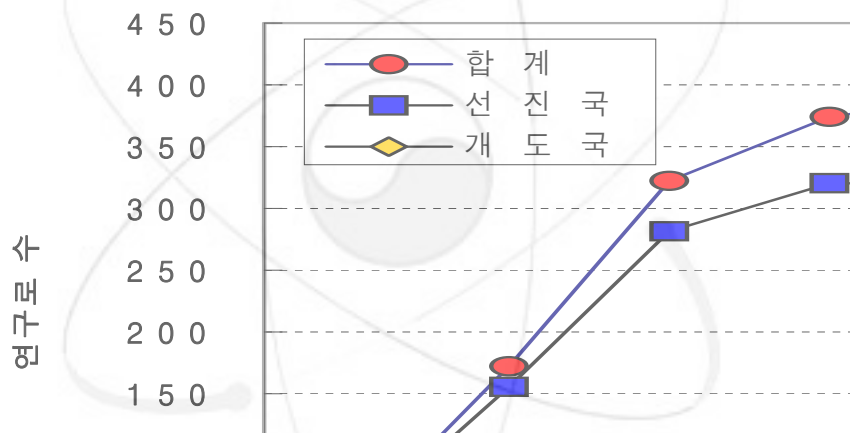
제 2 장 연구개발 내용

제 1 절 연구용 원자로 기술 현황 분석

1. 세계 연구용 원자로 현황

(가) [표. 1], [그림. 1] 및 [그림. 2]는 2008년 현재까지 IAEA 데이터 센터에 등록된 총 669기의 세계 연구용 원자로를 보유 국가별로 계획, 건설, 가동, 정지 및 폐로와 같이 상태에 따라, 년도 별 변화추세를 선진국과 개도국의 구분에 따라, 또 가동 연령에 따라 정리한 것이다.

[부록 I]에 이들 연구용 원자로의 현황, 이력 및 특징을 간략하게 정리하여 수록하였으며 참고로 [부록 2]에 발전용원자로를 보유하고 있는 국가들의 연구용 원자로 운영 현황을 첨부하였다.



[그림 1] 년도별 가동 중인 연구용 원자로 수의 변화

[그림 2] 가동 중인 연구용 원자로의 연령 분포

[표 1] 세계 연구용 원자로 현황*

(*'08. 7월 현재, 단위 : 기)

국 가 명	가동중	정지중	폐로	계획중	건설중	미확인	계	국 가 명	가동중	정지중	폐로	계획중	건설중	미확인	계
가나	1						1	우루과이		1					1
그리스	2	1					3	우즈베키스탄	1						1
나이지리아	1						1	우크라이나	1	2					3
남아프리카	1						1	유고슬라비아	1	1					2
네덜란드	3		2				5	유럽연합		1					1
노르웨이	2						2	이라크		2					2
대만	1	3	2		1		7	이란	5						5
덴마크		2	1				3	이스라엘	1						1
독일	12	11	23				46	이집트	2						2
라트비아		2					2	이태리	4	5	5				14
러시아 연합	49	36	11		1		97	인도	5		4		1		10
루마니아	2	1	1				4	인도네시아	3			1			4
리비아	1						1	일본	13	7	3				23
말레이시아	1						1	자메이카	1						1
멕시코	3		1				4	조지아		1					1
모로코					1		1	중국	14	2			2		18
미국	41	117	69				227	체코	3		2				5
방글라데시	1						1	칠레	1	1					2
베네수엘라		1					1	캐나다	8	5	3	1	2		19
베트남	1						1	카자흐스탄	3						3
벨기에	4	2					6	콜롬비아	1						1
벨라루스			1				1	콩고	1	1					2
북한	1						1	태국	1				1		2
불가리아		1					1	터키	1	2					3
브라질	4						4	튀니지				1			1
스웨덴		3	1				4	파키스탄	2						2
스위스	3	2	1				6	페루	2						2
스페인		1	3				4	포르투갈	1						1
슬로베니아	1						1	폴란드	1	2	2				5
시리아	1						1	프랑스	13	13	5	1			32
아르헨티나	5	2					7	핀란드	1		1				2
알제리	2						2	필리핀		1					1
영국	2	7	27				36	한국	2	2					4
오스트레일리아	1	2	1				4	헝가리	2		1				3
오스트리아	1	2					3								
총 계								241	245	170	4	9		669	

(나) 1950대부터 70년대 초까지 연구용 원자로의 건조가 선진국을 중심으로 활발하게 이루어져 왔으나, 1970~75년을 분수령으로 연평균 5기가 운전정지

에 들어가는 추세를 보이는데, 이는 주로 당초 목표한 연구용 원자로의 활용분야에 대한 효용성 및 경제성이 한계에 도달하므로 이들 연구용 원자로의 이용 수요가 전반적으로 감소함과 동시에 원자력발전산업의 급격한 위축으로 연구용 원자로를 이용한 새로운 기술개발 요구가 활성화되지 못했기 때문에 신규 연구용 원자로의 건설 계획이 실행되지 못한 것에 기인한다.

반면에 개도국은 1990년까지 완만하지만 꾸준히 증가하는 추세를 보였으나 이후는 거의 정체된 모습을 보이는데, 이는 개도국의 원자력발전 도입 계획이 유명무실한 상태에 있는 것과 무관하지 않다.

(다) 이상의 총 669기 가운데 전력생산 또는 prototype으로서 본 연구의 목적에 맞는 연구용 원자로 범주에 포함시키는 것이 부적합하다고 생각되거나 이미 폐로되어 더 이상 활용이 불가능하다고 판단되는 196기를 제외한 나머지 473기를 출력, 연령, 지역 및 목적에 따라 분류하였다.

이 중에서 장기 가동중단 중에 있는 것이 231기로 전체의 49%를 차지하고 있고, 171기(36%)가 30년 이상의 가동연령에 이른 반면에 단지 7기만이 임계후 10년에 미치는 못하는 것으로 나타났다.

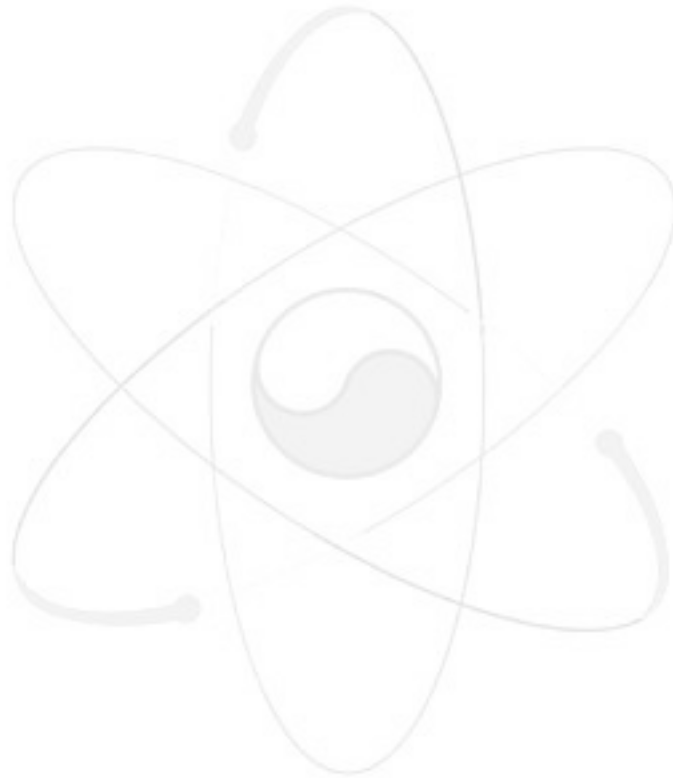
(라) 다음 표들은 이들 연구용 원자로에 대해 앞서 기술한 분류기준에 따라 구분한 분포 특성을 정리한 것이다.

a. 출력대비 연령;

	0~10년	10~30년	30년 이상	운전정지	계
0~1kw	1	19	51	85	156
1kw~2Mw	1	28	69	87	185
2Mw~20Mw	4	11	34	32	81
20Mw 이상	1	6	17	27	51
계	7	64	171	231	473

b. 출력대비 지역;

	아시아/호주	유럽	미주	중동/ 아프리카	계
0~1kw	13	79	61	3	156
1kw~2Mw	26	61	86	12	185
2Mw~20Mw	15	35	19	12	81
20Mw 이상	10	22	17	2	51
계	64	197	183	29	473



c. 출력대비 목적;

	교육 및 훈련	다목적 연구	재료시험 + 동위원소	빔이용 연구 + 동위원소	계
0~1kw	120	21	15	0	156
1kw~2Mw	31	142	12	0	185
2~20Mw	2	68	10	1	81
≥20Mw	0	17	31	3	51
계	153	248	68	4	473

d. 연령대비 지역;

	아시아/호주	유럽	미주	중동/ 아프리카	계
0~10년	5	1	0	1	7
10~30년	20	23	9	12	64
30년 이상	20	83	58	10	171
운전정지	19	90	116	6	231
계	64	197	183	29	473

e. 연령대비 목적;

	교육 및 훈련	다목적 연구	재료시험 + 동위원소	빔이용 연구 + 동위원소	계
0~10년	2	3	2	0	7
10~30년	21	36	7	0	64
30년 이상	60	99	8	4	171
운전정지	70	110	51	0	231
계	153	248	68	4	473

f. 지역대비 목적;

	교육 및 훈련	다목적 연구	재료시험 + 동위원소	빔이용 연구 + 동위원소	계
아시아/호주	15	42	7	0	64
유럽	81	89	25	2	197
미주	54	92	35	2	183
중동/아프리카	3	25	1	0	29
계	153	248	68	4	473

(마) 이들의 분포 특성을 분석하면,

- a. 현재 세계에 있는 연구용원자로의 70% 이상이 2MW 이하의 저출력원자로로서 주로 교육과 기초연구에 이용되어 왔으나 이 가운데 80% 이상이 미주 및 유럽의 선진국이 보유해온 것이며 또한 85% 이상이 30년 이상 운전되거나 장기간 가동중지 상태에 있다는 점을 고려하면 효율성의 한계에 왔다고 볼 수 있다. 타 지역의 저출력연구용 원자로도 이미 유효수명에 도달하였다고 판단되므로 교육 또는 연구용으로서의 활용분야 패러다임에 획기적인 변화가 없다면 수요재창출보다는 폐로될 전망이 크다.
- b. 2~20MW의 중출력급 연구용 원자로는 약 85%가 중성자 및 방사선을 이용한 다양한 연구목적의 다목적 연구용 원자로로 분류되며, 그밖에 12%가 재료시험용으로 활용되어 왔다. 동류 연구용 원자로의 중성자속 수준이 활용분야 및 성능 수용의 융통성이 크기 때문에 각 지역에 비교적 골고루 분포하고 있으며, 역시 80% 이상이 30년 이상 운전되고 있거나 장기 가동중지 상태에 있다. 특히 운전수명이 30년 미만인 경우 상당수가 아시아, 호주, 등에 위치한다. 동 규모의 연구용 원자로는 획기적인 비출력 개선이 이루어지지 않는 한 북미 및 유럽과 같은 선진국의 주요 연구과제인 초고연소도핵연료(75,000MWD/teU 이상) 또는 Gen IV 원자로의 재료개발에 필요한 성능요건을 충족할 수 있는 재료시험로의 효율가치가 크지 않기 때문에 개조후 재활용 가능성이 크지 않을 것이다.
- c. 20MW 이상 고출력 연구용 원자로의 경우도 타 용량의 연구용 원자로와 유사한 경향을 보이지만 아시아 지역 국가의 보유수가 비교적 많고(~20%) 재료시험과 중성자 beam 이용 기초연구와 같은 특수목적이나 다목적 연

구, 등 폭넓은 활용 분야에 기여해 왔다.

- d. 중성자 beam 이용연구 목적으로 사용해온 중대용량 연구용 원자로는 타종의 연구용 원자로부터 평균 가동 년수가 높다. 이는 꾸준한 실험설비의 개선과 더불어 효율가치를 활발하게 개척해온 결과로 볼 수 있다. 그러나 제공 가능한 중성자속 밀도가 새로운 이용 연구 분야를 개척하는 데는 한계에 도달하였다고 판단된다.
- e. 지역적으로 볼 때, 유럽 및 미주를 제외한 국가에서 보유한 연구용 원자로는 상대적으로 연령이 낮은 반면에 중대 용량의 비율이 훨씬 큰 것으로 나타났다는데, 이는 일본, 중국 및 인도와 같이 일찍부터 의욕적으로 원자력기술 자립을 추진한 국가들이 다수의 재료시험 및 실증용 연구용 원자료를 개발, 확보하였기 때문인 것으로 분석된다.

(바) 이상의 분석을 종합적으로 정리하여 보면,

- a. 2007년말 현재 세계 31개국이 원자력발전을 이용하여 전력을 생산하고 있으며 이 가운데 연구용 원자료를 운영한 경험이 없는 국가는 유고 연방에서 독립한 슬로바키아뿐이다. 특히 전력생산의 원자력 의존도가 큰 국가들은 비록 현재에는 가동을 중단 상태에 있지만 모두 다수의 연구용 원자료를 운영하면서 원자력 초창기에 교육과 훈련에 활발하게 이용하였다.
- b. 과거 연구용 원자로의 핵심 기능 가운데 하나였던 원자력 교육 및 훈련을 위한 기초연구의 주요 부분은 simulator를 이용한 사이버 공간에서 해결할 수 있을 것으로 볼 때, 앞으로 교육 및 훈련용 저출력 연구용 원자로의 수요는 크게 증가하지 않을 것으로 보인다. 가동 중인 연구용 원자로라 할지라도 대부분 장기적인 운영계획이 불분명한 상태에 있고 다가올 원자력 르네상스에 대비하는 연구용 원자로의 미션과 비전에 대한 적극적인 활로 모색이 눈에 띄지 않는다. 그러나 이 목적의 연구용 원자로와 관련된 문제로 고농축우라늄의 대체하거나, 활용 가치가 끝난 연구용 원자로의 개조 및 폐로 등에 관한 활동은 당분간 지속될 전망이다.
- c. 기존 상용원전의 건설 확대, 제4세대 원전의 상용화, 핵융합로의 실용화와 같이 원자력 르네상스를 대비한 연구용원자로의 수요는 주로 혁신기술 및 재료개발에 집중될 것이다. 그러나 원자력기술개발의 투자효율성에 대한 문제로 독자개발 보다는 국제협력을 통한 공동개발을 선호할 것으로 예상되어 공동연구시설로서 고출력 재료시험로의 확보를 고려해야할 것이다.

- d. 중진국 또는 개발도상국 가운데 자국의 원자력 연구의욕을 촉진하거나 연구 환경을 업그레이드하기 위해 10~30MW급 중출력 다목적연구용 원자로 보유를 희망하는 국가들이 다수 출현할 것이 기대되며, 이 경우 북미와 서구유럽을 제외한 지역이 주대상이 될 것이다.
- e. 중성자 빔을 이용한 물성연구 및 재료개발과 같은 특수목적의 연구용 원자로는 지속적인 수요가 있을 것이며, 고도의 정밀도와 분해능을 요구하는 극한상태의 물성 연구는 현재보다 더 높은 고밀도중성자속 환경을 제공해야하므로 최소한 고출력 연구용 원자로 범주에 포함되어야 할 것이다. 그러나 특수목적의 연구용 원자로라 할지라도 동위원소 생산능력을 함께 보유하는 것이 중요하다.

2. 연구용 원자로 기술개발 현황

최근 연구용 원자로 기술개발과 관련하여 진행 중이거나 발생된 주요 현황들은 다음과 같다.

- (가) IAEA는 TWGRR(Technical Working Group on Research Reactors)을 활용분야 분과, 노형개발 분과, 핵주기 분과, 운전이슈 분과, 지속가능성 분과의 소그룹으로 분류하여 구성하고, 연구용 원자로의 운전, 이용, 핵주기(가공, 사용, 저장 및 수송), 보수유지, 개조, 개량, 품질보증 및 폐로에 관한 협력 프로그램을 체계적으로 운영.
- (나) IAEA는 2008년 10월 연구용원자로 관리규정을 완성하고 의견수렴을 위한 국제회의를 개최.
- (다) 노형개발 분과에서는 기존 연구용 원자로의 개조 및 개량사업과 신규 연구용 원자로 건조사업을 구별하여 지역단위로 지원하는 체제로 운영.
- (라) Argentina는 MTR형 20%농축 핵연료를 사용하는 출력 5MW(후에 10MW로 출력 증강) pool-type 다목적연구용 원자로의 건조경험을 살려 고유 모델을 개발하고 Peru에 RP-10(10MW;1988), Egypt에 MPR 또는 ETRR-2 (22MW;1997) 및 Australia에 OPAL(20MW;2006), 등 해외 수출에 뛰어난 성공 실적이 있으나 2007년 8월 OPAL의 중수탱크의 누수, 핵연료관의 위치 이탈(5 assembly), 등 심각한 기술적 문제가 발생하여 운전 중단을 겪었다. 최근에 와서 재가동이 허용되었음에도 불구하고 기술

의 신뢰도에는 오점을 남기는 결과를 가져왔음.

- (마) EU 국가들이 보유하고 있는 주요 연구용 원자로는 HFR, BR-2, OSIRIS, FRM-II, 의 대체를 목표로 100MW, $\sim 10^{15}$ nv급 대형 연구용 원자로 RJH 를 2007년에 착공. IFMIF(International Fusion Material Irradiation Facility)는 ITER의 개발계획과 병행하여 14MeV 속중성자 조사에 의한 핵융합로의 내벽재료의 내구성시험을 목적으로 EU, 일본, 미국, 러시아가 2017년 가동을 목표로 공동개발하고 있는 가속기 기반 중성자발생장치임. 이밖에 EU는 사용후핵연료 및 고준위폐기물의 핵변환처리, Gen IV, ADS 및 핵융합로용 핵연료 개발, 납냉각고속로의 기술실증을 위한 가속기구동 고속중성자조사시설 목적의 MYRRHA가 2020년에 가동을 목표로 벨기에 원자력연구소인 SCK·CEN에 건설을 목표로 개발하고 있다. 그 밖에 물리학, 동위원소 생산, 원자력공학 분야 연구에서 국제연구기관들의 적극적인 참여를 기대하면서 네덜란드에 PALLAS 건설이 추진 중.
- (바) Gen IV 개발사업이 본격적으로 추진될 경우, 핵연료, 재료, 신기술 개발 및 검증에 사용될 수 있는 고성능 재료시험로의 필요성 예상.
- (사) 고농축우라늄 핵연료의 대체를 위해 1978년 ANL에서 시작된 RERTR (Reduced Enrichment Research and Test Reactor)프로그램이 전 세계에 가동 중인 연구용 원자로의 성능요건에 충족될 때까지 우수한 저농축 (LEU) 우라늄 핵연료기술 개발이 지속될 전망.
- (아) 현재 세계 연구용 원자로의 20%를 점유하고 있는 러시아가 2009-2011에 100 MW급 PIK 및 2010년에 IBR-2M 출력증강 예정, 등 21세기에는 연구용 원자로의 수출국으로 나설 가능성(International Conference on Research Reactors in the 21st Century, held on 20-23 June 2006 Moscow)이 큼.
- (자) 캐나다의 10MW급 MAPLE 원자로 계획이 중단되면서 특히 Mo-99 수급에 차질을 우려하는 세계 동위원소 시장과 의료기관의 불안이 가중되고 있어서 앞으로 의료용 동위원소의 안정적 공급을 위해서 핵확산 저항성과 경제성이 우수한 동위원소 생산용 연구용 원자로의 필요성이 재차 강조될 것임.

3. 연구용 원자로 수출시장 현황

(가) 최근 유가의 급격한 상승과 지구 환경변화에 대한 문제점들이 심각하게 대두됨으로서 원자력에 대한 관심이 새롭게 증가하고 있고, 이에 맞도록 성능과 안전성이 대폭 개선된 원자력발전의 수요가 늘어날 것으로 전망된다. 따라서 발전로의 도입을 계획하는 국가들은 원자력 기술 개발과 인력 양성에 필요한 인프라를 구축할 목적으로 연구용 원자로 건설과 노후 연구용 원자로의 대체를 고려할 것으로 기대한다. 그러나 연구용 원자로 설비는 발전로 설비에 비해 사업 및 시설 규모가 작고, 표준화된 규격상품으로서 보다는 수요자 요구에 맞춘 주문 상품의 특성으로 인해 상업적인 측면에서는 많은 주목을 받지 못하고 있다. 이로 인해 세계적으로 연구용 원자로를 설계·건설하는 종합적 능력과 경험을 갖춘 민간 공급업체는 많지 않은 편이다.

세계 연구용 원자로 공급업체 가운데 가장 역사가 깊으며, TRIGA라는 상품명으로 24개국에 정출력 20kW~16MW의 다양한 용량으로 65기를 공급해온 미국의 General Atomic사가 대표적이며 지금도 꾸준히 연구용 원자로 시장 개척에 힘쓰고 있다. TRIGA는 고유안전성이 매우 크고, 펄스 운전이 가능한 연구용 원자로로 표준화된 핵연료를 사용하므로 운전경험이 부족한 개도국들이 선호할 수 있는 업체이다.

(나) 미국, 프랑스, 캐나다, 일본, 독일, 아르헨티나, 러시아, 중국 등 국가지원 연구 개발 또는 원자력 산업기관들이 자체적으로 연구용 원자로를 설계/건설/사업 관리할 능력을 축적하고 있으나, 앞서 밝힌 이유로 해외시장 개척에는 비교적 소극적이다. 이러한 부류에 속하는 기관으로서 캐나다의 AECL, 일본의 JAEA, 아르헨티나의 INVAP, 프랑스의 AREVA 등을 들 수 있으며, 이들 중 현재 연구용 원자로 시장에 적극적으로 관심을 갖는 기관은 프랑스의 AREVA와 아르헨티나의 INVAP 정도이다.

(다) 캐나다의 AECL은 연구용 원자로뿐만 아니라 동위원소 시장에서 강력한 경쟁자가 될 수 있는 능력은 가지고 있으나, MAPLE의 운전허가 및 NRU의 연장운전허가의 실패, 그리고 동위원소생산 전문회사인 MSD Nordion과 법적인 관계 때문에 동위원소생산 목적을 포함하는 연구용 원자로를 해외로 수출하기가 어려운 실정이다.

(라) 연구용 원자로를 공급하는 기관들은 대부분 연구용 원자로용 핵연료를 묶

어 공급할 수 있는 능력을 갖추고 있음에 반해 독일의 NUKEM은 핵연료 공급에 특성화된 업체이다.

(마) 가장 강력한 연구용 원자로 수출 경쟁회사인 AREVA나 INVAP은 현재 네덜란드 PALLAS 건설 사업 입찰에 한국 컨소시엄과 함께 경쟁 중이며, 연구용 원자로의 설계/건설/관리의 일괄 체계를 갖추고 있고, 수출 경험도 있는 강점을 가진 기관이다. 또한 프랑스 AREVA는 최고 성능의 100MW JHR 연구용 원자로를 2007년부터 건설 착수를 하였고, 아르헨티나 INVAP은 1997년에 이집트의 22MW ETRR-2, 2006년에 호주 ANSTO의 OPAL 연구용 원자로를 건설한 최근의 경험이 있는 것이 한국에 비해 유리한 것으로 평가된다.

그러나 장기적 안목에서 볼 때, 세계 연구용 원자로 시장에서 가장 강력한 경쟁자는 미국의 GA사라 할 수 있으므로, TRIGA형 연구용 원자로의 설계특성, 활용상 장단점 등에 대한 충분한 자료를 확보하고 구체적인 분석 및 평가를 해둘 필요가 있다.

4. 국내 연구용 원자로 개발 현황

(가) 연구용 원자로 연구개발 실적 및 경험:

우리나라는 세계가 원자력의 평화적 이용에 대해 기지개를 켜기 시작한 1950년대부터 이미 원자력의 중요성을 인식하고, 열악한 경제구조 아래서도 원자력 인력양성과 기초연구를 위한 핵심연구시설인 TRIGA 연구로를 보유할 결단을 내렸다. 이에 원자력 선진국에 뒤지지 않는 50년의 연구로 운영 및 이용역사를 자랑할 수 있게 되었고 1990년대에 이르러 세계 최고급 연구로인 하나로를 자력 설계, 건설, 운영할 수 있는 경험과 능력을 축적하게 되었다.

현재 우리나라의 연구로 기술 능력을 종합해 볼 때, 다음과 같이 평가할 수 있을 것이다.

a. 종합 엔지니어링기술;

하나로의 설계 및 건설을 통해 풍부한 경험을 습득할 수 있었으나, 확보된 기술의 지속적 발전을 위한 후속사업이 없었던 관계로 설계 자료의 체계적 관리와 기술력 유지가 현실적으로 힘들었다. 그러나 원자력산업의 세계적 침체로 연구용 원자로의 설계 및 건설이 근래 들어 미미했고,

특히 고성능 다목적 연구용 원자로에 대한 경험이 부족한 것에 비추어 볼 때, 하나로의 설계/건설/운영/이용을 통해 원자력플랜트 기술 전주기에 경험이 많은 현업 인력을 보유하고 있는 것은 매우 큰 장점이다. 또한, SMART, OPR1000, APR1400 등의 설계/건설/운영 경험은 연구용 원자로 개발사업에도 활용 가능하며, KAERI의 연구용 원자로 설계 및 운영 경험과 KOPEC 및 두산중공업의 엔지니어링 및 제작 경험을 고려할 때, 우리나라는 연구용 원자로를 설계/공급할 기술적 능력은 갖추고 있다고 판단된다.

b. 원자로 및 핵연료 기술;

국내에서는 하나로의 봉형 핵연료 및 이를 이용한 노심에 대해서는 상당한 경험이 있다. 그러나 봉형 핵연료의 경우 20MW 이하의 연구용 원자로에는 우라늄 장전량이 판형보다 많다는 점에서 장점이 있으나, 30MW 이상의 대형 연구용 원자로에는 핵연료 냉각 면적과 로심 소형화, 등을 고려할 때, 판형 핵연료보다 성능 및 안전성 측면에서 경쟁력이 낮다. 따라서 높은 출력밀도와 높은 중성자속 요건을 만족하는 중·대형 원자로에서 판형 핵연료를 사용할 경우, 노심 구조설계에도 유리한 점이 많기 때문에 장기적으로 볼 때, 판형 핵연료 및 이를 사용하는 연구용 원자로의 개발이 바람직하다.

현재 판형 핵연료를 사용하는 네덜란드 PALLAS 연구용 원자로의 입찰을 위해 개념 개발 및 개념설계 중에 있고, 개발된 모델 및 설계 자료와 입찰 자료는 추후 발생하게 될 후속 연구용 원자로 설계 및 수주에 활용 가능할 것이다.

또한 원자로 기술 수출의 신뢰성에 관계가 깊은 핵연료 및 원자로의 구조물 재료와 구조 건전성 설계 자료를 다양하게 확보하는 것이 중요하다. 일반적으로 개념 설계 수준에서는 공학적 판단에 따라 설계가 가능하나 인허가를 위해서는 필수적으로 검증된 설계 자료가 필요하다. 이러한 설계자료 확보를 위해 핵심 개념의 설계검증시험을 수행해야하며 시험로 수준은 아니더라도 재료 및 구조물에 대한 제작기술의 검증 과정이 요구되어진다.

c. 설계 및 안전해석용 코드:

원자로의 해외진출 시 software 측면에서 가장 중요한 것이 설계 및 해석에 사용되는 전산코드이다. 연구용 원자로는 설계 코드가 대부분 개방

되어 있고 운전조건이 비교적 단순하므로, 노심설계 경우 핵연료 특성이 나 중성자 스펙트럼에 적합한 코드를 선택하여 설계를 수행할 수 있다. 그러나 이러한 코드는 대부분 1950~1970년대 컴퓨터시스템의 용량과 계산 속도에 맞도록 개발되었기 때문에, 고성능의 다목적 연구용 원자로나 재료시험로와 같이 가정 조건이 복잡하거나 높은 신뢰도를 요구하는 계산에는 한계가 있다.

또한 코드의 적용범위의 제한은 공학적 설계와 별도로 공급자로서 신뢰성을 갖추기 위한 코드 검증이 필수적으로 요구되므로 코드의 특성을 정확하게 판단할 필요가 있다. 따라서 가능한 코드의 신뢰성 검증을 위해 최소한 2가지 이상의 코드를 독립적으로 수행하여 비교할 필요가 있으며, 3차원 계산과 같은 정교한 작업이 가능한 최신 코드가 제공할 수 있으면 사업 수주에 유리할 것이다.

[표 3]에는 아르헨티나 INVAP이 호주 OPAL 연구용 원자로에 사용한 전산코드와 하나로 및 향후 수출시 사용될 코드를 비교한 것으로 전산코드에 의한 수출 제약은 없을 것으로 판단된다. 다만, 설계노심이 판형 핵연료인 경우에는 검증이 작업이 수행되어야 한다.

d. 기기 제작 및 공급;

캐나다 AECL과 공동연구용 원자로 설계된 하나로는 봉형 핵연료를 사용하고 노심도 이에 적합하게 설계되었다. 공동연구 계약으로 AECL은 설계사양에 따라 원자로 구조물, 핵연료, 원자로제어장치, 중수, 빔튜브, 중성자 검출기 부품을 공급하였다. 현재 우리나라는 이러한 원자로구조물, 핵연료 등 주요 기기 및 장치를 대부분 국내에서 제작할 수 있는 수준에 도달해 있으며, 필요에 따라 수입 가능한 세계시장에 대해서도 상당한 기술정보를 갖고 있다. 따라서 봉형 핵연료 사용 연구용 원자로에 대해서는 기술적으로는 거의 설계 제작이 가능하다고 판단된다.

그러나 공동연구의 결과물에 대한 계약서상 원천기술의 소유권 구분이 명확하지 않기 때문에 하나로에 기반한 기술로 해외진출을 할 경우, 사업 진행과정에서 분쟁이 발생할 가능성이 있다. 가장 강력한 지적소유권 보호 장치인 특허권이 20년 보장이므로 특허가 없고 계약 후 20년이 경과한 기술에 대한 기술 소유권 주장은 무리라는 의견과, 다른 한편으로 계약서상에 기술되어 있으므로 문제의 소지가 있다는 의견의 대립으로 통일된 유권해석이 아직 이루어지지 못한 상태이다. 만일 문제가 사업 진행

중에 발생한다면 분쟁해결이 사업 기간 및 수주에 영향을 줄 수 있다. 그러므로 사업 진행 전에 원천기술 소유에 대한 분명한 해결 또는 대비를 하는 것이 이상적인 해결방안이 될 것이다.

e. 실험장치 설계 및 제작;

하나로에는 방사화분석 및 동위원소 조사용 rabbit, 핵연료 및 재료시험용 FTL, 냉중성자 beam 생산 및 유도용 CNS 및 중성자 라디오그래피 등 다양한 실험설비가 설계, 제작, 설치 및 운영되고 있는데, 이들 실험설비는 대부분 원자력 중장기 연구개발사업의 지원 아래 순수하게 국내 기술로 건조된 것이며, 지난 10 수년간 운영을 통해 설계, 제작, 설치 및 운영에서 발생하는 실질적인 문제를 해결할 능력도 갖추었다.

이는 새로운 연구용 원자로를 제공하는 기관으로서 매우 중요한 평가 기준에 해당된다.

f. 해체 및 폐로;

한국원자력연구소는 1997~2008년에 걸쳐 TRIGA Mark II 및 III의 시설물 내·외의 방사성물질을 모두 제염 및 해체하여 철거하므로 비방사선 구역으로 전환하는 사업을 완료하였다. 이 결과로 TRIGA Mark-II는 일반인의 출입이 제한받지 않는 기념관으로 사용하고, TRIGA Mark-II, 및 III 주변지역의 환경이 복원되었다.

이 밖에 대덕연구단지의 핵주기시설 재염, 고리 1호기의 증기발생기 교체, 월성 1호기의 압력관 교체 등 방사선 오염기기, 설비 및 건물에 대한 재염, 해체, 폐로에 관한 기술과 경험을 보유하고 있다.

(나) 연구용 원자로 운영 및 이용기술 개발 관련 국제기구 활동;

a. U₃Si, U-Mo 고밀도 우라늄 핵연료제조;

국내에서는 RERTR 프로그램에 적극적으로 참여하면서 고밀도 우라늄을 함유하는 U₃Si, U-Mo의 판형 핵연료 제조의 독보적 기술을 개발하므로 세계 최고의 연구용 원자로 핵연료기술을 확보하고 있다. 그러나 판형 핵연료의 상용공급을 위해서는 설계 자료의 문서화, 검증시험 및 제작 QA 분야에서 기술축적이 필요하다.

b. 연구용 원자로 운영 및 이용분야의 국제훈련센터 역할;

IAEA의 동아시아 및 태평양지역 회원국 간의 원자력기술 개발, 연구 및 훈련 협력 기구로서 Regional Co-operative Agreement가 한국원자력연구원에 유치되어 운영 중에 있으며, 하나로를 이용한 아태지역 원자력 기

술인력을 위한 다양한 교육, 훈련 프로그램이 개설되어 왔다.

따라서 다수의 회원국들이 동남아 국가들로서 원자력의 평화적 이용에 대한 연구 및 기술개발에 관심과 의욕이 매우 높은 반면 고성능 연구용 원자로를 건조 및 운영할 만한 재원과 기술이 부족한 실정이다. RCA를 창구로 하는 동남아지역 원자력 전문인력 양성 훈련센터는 앞으로도 국제 원자력사회에서 우리나라의 위상을 높이는데 기여할 것이다.

- c. 하나로 건조사업이 착수될 시기에는 일본의 JRR-3 개조 및 인도네시아의 Ga Siwabessy MPR, 캐나다의 MAPLE과 같은 30MW급 다목적연구용 원자로의 건조사업이 한창이었고 이와 더불어 미국이 세계 최첨단 고성능 beam 이용 연구용 원자로인 200MW Advanced Neutron Source 개발사업이 착수되는 등 세계적으로 새로운 연구용 원자로의 필요성에 대한 관심이 고조되면서 미국의 ORNL, 캐나다의 AECL, 한국의 KAERI를 중심으로 국제연구용 원자로협의체인 IGORR(International Group on Research Reactors)가 결성되었으며 우리나라는 1998년 제6회 국제 심포지움의 주최국으로 세계연구용 원자로 이용활동의 주요국가로 관심을 끌기 시작했다.

[표 2] 연구용 원자로 설계용 컴퓨터 코드체계 비교

Field	OPAL	HANARO	ARR*	비고
1. Nuclear design				
- library	o WIMS-ESIN o HELIOS-ESIN	o ENDF/B-IV, ENDF/B-V o JENDL-2, UKNDL	o ENDF/B-IV, ENDF/B-V	o Open code로 사용에 문제없음
- neutronics	o CONDOR o HXS o CITVAP o MCNP	o WIMS-KAERI o REGAV-K, WIMPAK o VENTURE o MCNP	o WIMS-KAERI o VENTURE o MCNP	o Open code 수정 사용 문제없을 것으로 판단 o Open code로 사용에 문제없음
2. Shielding design				
	o ORIGEN-2, MERCURE, ANISN, DORT, MCNP	o ORIGEN-2, ANISN, DORT, MCNP	o ORIGEN-2, ANISN, DORT, MCNP	o Open code 또는 상용코드로 사용에 지장 없을 것으로 예상
3. T/H design				
- T/H design, ss analysis of fuel assembly	o THERMIC o CONVEC o CAUDVAP	o MATRA-h o TEMP2D	o MATRA-P	o KAERI 개선코드로 사용에 문제없음
- CFD	o CFX	o EL2D	o CFX, FLUENT	o 상용코드로 사용에 문제없음
4. Safety analysis				
- transient analysis (kinetics & TH)	o RELAP5-Mod3.2 o PARET-PC	o RELAP5/KMRR o KMRRSIM	o MARS	o 대상국에서 RELAP5를 사용할 수 있으면 MARS 사용에 문제없음
- consequence analysis	o ORIGEN-2 o PC-COSYMA (transient) o PC-CREAM (normal)	o ORIGEN-2 o PAVAN	o ORIGEN-2 o PAVAN	o USNRC Open code로 사용에 문제없음
5. Stress analysis				
	o COSMOS o MSC/NASTRAN		o ANSYS etc	o 상용코드로 사용에 문제없음

* ARR : 수출을 위한 연구용 원자로

제 2 절 연구용 원자로 시장 진입전략 수립

1. 연구용 원자로 수출사업 범위

ㄱ. 연구용 원자로는 다양한 과학기술 분야에 적용되는 만큼 이용 분야의 실험 및 활용 목적에 최적화된 성능 및 실험설비와 연계되는 설계개념을 갖는 연구용 원자로가 효과적 및 효율적으로 활용할 수 있다. 더 나아가 이용연구 분야의 발전에 따른 성능요건의 upgrade를 수용할 수 있도록 설계의 융통성이 확보되어야 한다. 따라서 연구용 원자로의 수출사업은 수명주기에 걸쳐 예상되는 after-service를 제공한다는 자세로 출발하는 것이 중요하다.

a. 폐로사업; 대부분의 기존 연구용 원자로는 건조 당시 국제원자력기구가 요구하는 폐로방안을 설계에 반영하지 않았고, 설계도면 및 자료의 보관요건도 엄격하지 못하여 폐로사업 진행 과정에 불확실성이 크다. 그러므로 장기간 가동중단 상태에 있는 연구로에 대한 폐로사업의 범위는 폐로, 제염, 복원, 폐기물처분 등으로서 다양한 성격의 폐로공정기술이 요구되며, 폐로 후 부지의 재사용, 기념관으로 개조 등의 추가 사업을 고려할 수 있다.

b. 핵연료교체 및 공급사업; RERTR 프로그램에 따라서 가동 중인 모든 연구용 원자로의 핵연료를 20% 미만의 농축우라늄 핵연료로 대체하는 사업이 IAEA 지원으로 진행 또는 계획 중에 있다. 이 사업은 노심변환에 따르는 노물리, 열수력학, 안전성 등의 성능해석이 선행되며, 핵연료의 공급 및 시험, 사용후 핵연료의 반환, 폐기물의 처리·처분 등의 업무가 포함될 수 있다.

특히 고성능 연구용 원자로의 경우, 핵연료집합체 단위부피당 우라늄밀도가 큰 핵연료 개발이 필수적이므로 우수한 우라늄합금 핵연료기술을 확보하고 있는 우리나라는 연구용 원자로 핵연료 사업에서 매우 유리한 고지에 있다. 반면에 농축 우라늄의 확보 및 공급 보장과 관련된 문제에 대한 복안이 준비되어야 한다.

c. 주기기 공급사업; 연구용 원자로의 주기기는 수량 및 규모 면에서 발전로에 비할 수 없지만, 국부적으로 극한조건을 만족하기 위해 정밀성 및 내구성에 있어서 오히려 더 까다로운 기술을 요구한다. 따라서 대기업의 대량생산체제 보다는 첨단정밀기술로 특성화된 중소기업을 육성하여 참여토록 하는 것이 더 효과적이며 부가가치가 높은 수출산업이 될 수 있다.

d. 실험장치 공급사업; 대부분의 실험설비는 연구용 원자로의 특성과 긴밀하게 연계되어야만 요구하는 성능을 낼 수 있으며, 장치 내에서의 중성자속 밀도,

잡음요소, 에너지 분포, 경로에서의 중성자속의 collimate 요건 및 유실량, 유도관 특성, 계측시스템 및 구동장치 제어시스템, 데이터 처리 및 분석시스템, 등 복합첨단시스템 요소를 모두 갖춘 설비의 설계, 제작, 설치, 시운전 등 종합엔지니어링 사업이다. 이는 국내에서 원자력연구원만이 보유할 수 있는 기술 배경과 경험 자료에 의존할 수밖에 없는 특수성을 안고 있다.

- e. 원자로시스템 개조 및 출력증강사업; 연구용 원자로는 수명주기 동안 수차례의 설비개선 및 출력증강을 통해 활용 가치를 배가할 수 있다. 현재 가동중단 상태에 있는 연구용 원자로 가운데 상당수가 원자력발전사업의 재기와 함께 요구되는 수요에 맞추어 다시 가동을 위한 개조 또는 출력증강이 요구될 것으로 기대된다. 이는 본래의 기술자료 관리가 최신기술 기준에 크게 미흡할 것이 분명하므로 새로운 연구용 원자로 건조사업보다 오히려 힘든 기술분야가 요구될 가능성을 배제할 수 없다.
- f. 신규 연구용 원자로 건조사업; 연구로와 관련된 사업 가운데 규모와 범위에 있어 가장 거대한 것이다. 본 과제의 주목적은 바로 원자력연구원이 해외의 신규 연구용 원자로 건조 사업에 참여할 경우를 대비하여서 사업의 전략적 요소를 규명하고 이를 구현하는 방안을 개발하여 제시함에 있다. 따라서 본 연구의 범위는 사업 준비단계부터 수주단계에 걸쳐 예상되는 사업계획 수립 및 관리를 포함한다.
- g. 설계용역사업; 이 경우는 위 항의 사업 가운데 특별히 설계엔지니어링 분야만을 대상으로 한다.
- h. 중장기 연구용 원자로이용 원자력기술 및 정책개발 용역사업; 원자력발전을 도입하려는 국가는 방사선 및 원자력 기초기술 교육, 훈련에 가장 효과적인 연구용 원자로를 보유함과 동시에 국가 원자력 연구개발 중장기 종합계획의 수립에 관심을 갖게 된다. 이 계획을 개발하는데 필요한 정책 및 기술자문을 요청하는 경우에 사업으로 발전시킬 수 있다. 우리나라를 비롯하여 대부분의 개발도상국들이 원자력발전사업을 계획하면서 추진전략으로 사용해온 방법이다.
- ㄴ. 이러한 환경에서 하나로 건조 및 TRIGA 제염사업을 통해 축적된 국내 기술 개발 경험에 근거하여 연구용 원자로 관련 사업의 경제적 규모를 예측하여 [표 3]에 정리하였다.

[표 3] 연구용 원자로 제품 국내 현황 및 수출 예상 금액

제품	수출 예상 금액	국내 현황
연구용 원자로	약 2000억원 (20MW기준)	○ 하나로 (30MW) 설계 및 운영 중 ○ 20MW급 연구용 원자로 노심을 개발 중
핵연료	다발 개당 약 1억원	○ 하나로 핵연료 자체 개발 공급 ○ 핵연료 재료 개발 및 선진국 수출
Beam 이용 실험장치 (중성자 검출기 등 구성 기기별로도 가능)	실험 설비당 약 10억원 이상(기기 별 수백~수천만원)	○ 다양한 빔이용 실험장치 개발 및 하나로에서 활용 중
동위원소 및 NTD 장치	장치당 수천만원	○ RI 장치 개발 및 해외 수출 ○ NTD 장치개발 및 NTD 반도체를 생산하여 일본에 수출
교육 프로그램	유동적 (협의)	○ 중국 및 대만 연구용 원자로 관계자 훈련 실시
폐로	기당 약 500억 (2MW TRIGR 기준)	○ TRIGA MARK-II & III 해체
하나로 시험장치 이용 실험시험	유동적 (협의)	○ 노내 조사시험설비(FTL), 냉중성자설비 등 설치 중

2. 연구용 원자로 수출상품 옵션

ㄱ. 새로운 연구용 원자로를 제공하는 사업에서 각 분야별 구성요소는 원자로를 중심으로 이용 설비 및 장치 등의 하드웨어적 제품과 설계, 건설, 인허가 및 사업관리 지원이나, 교육, 훈련, 등의 소프트웨어 제품으로 나눌 수 있다. 분야별 조합 방법은 설비 및 장치공급 중심으로 예를 들면, 연구용 원자로+핵연료+빔 실험장치, 연구용 원자로+동위원소+NTD 장치 등이 있다.

각 제품을 독립 단위로 수출할 수 있고, 제품의 구성기기 공급도 고려할 수 있다. 지금까지 동위원소의 생산 장치 등 일부는 수출 실적이 있으며, 특히 교육 프로그램의 경우 하나로 운영 기술의 우수성이 세계적으로 인정받아 몇 차례의 수출 경험도 있다.

이외에도 연구용 원자로의 운영 및 이용 기술에 대한 경험을 활용하여 하나로의 조사시험 및 실험시설을 활용한 조사시험이나 실험기술도 수출 품목이 될 수 있을 것이다.

ㄴ. 현재 가동 중 또는 장기간 가동이 중단된 연구용 원자로를 상대로 폐로, 개조

및 출력증강사업의 타당성을 조사, 분석하는 사업개발 프로그램을 개발하여 홍보활동에 이용할 경우 의외로 좋은 효과를 가져 올 수 있다.

3. 취약 및 보완 사항에 대한 개선 방안

ㄱ. 현기술상태의 취약성

a. 1990년대의 실증기술에 기반을 둔 설계;

원자력 시설은 안전성이 중요하므로 반드시 검증된 설계 및 건설 기술을 사용해야 한다. 하나로 설계는 1990년 초 당시의 실증기술에 기반을 두고 있어서 그 이후 괄목할 만한 혁신을 이룬 컴퓨터, 통신정보, 재료 분야의 기술을 이용하여 설계할 경우, 성능, 운전성, 안전성, 활용성 및 미적 설계에 커다란 개선이 가능할 것이다. 이러한 새로운 환경 및 조건에서 최적의 성능을 갖는 최적화 설계를 개발하는 설계 연구가 사업개발에 앞서 꾸준히 진행되어야 할 것이다.

예를 들면, MMI(man-machine interface) 시스템은 당시 최신의 플랜트제어 기술이었던 programmable control 개념을 적용하여 혁신적인 제어실 및 제어계통 설계가 이루어졌으나, 현재 컴퓨터 기술수준으로 볼 때, 운전상황을 반영하는데 필요한 데이터 처리, 분석 및 전달에 필요한 용량과 속도에서 크게 개선할 여지가 있다.

b. 2000년대 초의 활용성을 목표로한 성능요건;

연구용 원자로의 성능 및 기능설계 목표는 설계수명 동안 예상되는 활용분야의 요구조건에 맞추는 것이 합리적이다. 당연히 1985년에 개념설계를 시작한 하나로에는 당시 예상 가능한 2000년대 초의 연구용 원자로 이용 분야 및 범위를 most probable 성능요건으로 정하고 활용성이 최대가 될 수 있도록 설계되었기 때문에, Gen IV의 대두나 ITER의 건설과 관련된 재료개발, 생명과학이나 nano 기술의 기반이 되는 물성연구, 등 미래 혁신 기술개발 목적에 맞는 고성능 연구용 원자로를 요구하는 수요자 요건을 만족시키는데 제한이 있을 것으로 예상된다.

특히 핵연료의 개선은 이러한 예 중의 하나이다. 1978년 세계원자력계 의견수렴으로 탄생한 RERTR 프로그램 기술개발 성과를 기반으로 1986년 미국의 NRC가 미국내 모든 연구용 원자로의 핵연료를 20% 미만 농축도로 교체하도록 결정되었다. 당시 노내 조사시험을 거쳐 높은 신뢰성이 검증된 Silicide 핵연료물질을 사용하며 또 국내 CANDU 핵연료국산화사업의 노내

실증실험 요구사항을 만족하도록 캐나다 AECL의 봉형 다발핵연료를 하나로 핵연료로 선정하고 이를 기반으로 원자로를 설계하게 되었으나 이는 미래의 연구용 원자로 수요자의 중요 요구조건을 만족시키는 원자로 설계에는 최상의 핵연료가 아닐 가능성이 크다.

c. 다목적 연구용 원자로의 제약조건;

하나로는 당초 성능설계 구비조건을 확정하기 위해 예상 이용분야를 조사하여 기능 설계요건을 정리하고, 이를 수용함에 있어 활용중요도를 가중하여 활용성을 최적화한 다목적 연구용 원자로가 되도록 설계하였다 그러나 이러한 다목적 연구용 원자로의 설계요건은 동시에 다양한 실험을 수용함에 있어 공간적, 성능적 간섭사항을 최소화하는 것이 중요하며 따라서 우선순위가 높은 특정 목적의 실험 조건 및 환경을 제공하기 위해 다른 실험 계획을 중단해야할 경우가 발생하므로 이용자의 불편을 가져올 수 있다.

또한 다목적 연구용 원자로의 설계가 모든 예상 활용분야의 요건을 모두 반영해야하므로, 설계 당시 기준으로 상대적으로 활용빈도가 떨어진다고나 활용가치가 낮은 분야의 성능요건을 만족하기 위해 경제성 관점에서 최적화 설계가 어렵다. 이는 연구용 원자로의 수명을 30년 이상으로 볼 때, 수명기간 동안에 활용성 우선순위가 바뀌는 경우에는 더 큰 문제가 될 수 있다.

예를 들면, 하나로 기능설계는 원전핵연료 개발을 위한 시험루프의 성능요건을 최우선적으로 만족하도록 요구됨에 따라 몇 종의 beam 유도관은 길이가 길어지면서 초기의 중성자속 밀도 성능요건에서 손실이 불가피했다.

ㄴ. 개선 방안 수립

a. 기술능력 DB;

연구용 원자로의 주요 기기, 설비 및 구조는 상용 발전로와 달리 표준화되어 있지 못하고, 수요자의 요구조건에 대한 종속성이 매우 크기 때문에 공급업체가 중소, 정밀 및 첨단산업체의 특성을 가져야 한다. 그러므로 국내 산업체의 활용 범위와 해외후보 공급업체의 조사가 사업성공의 중요 요소이다.

b. 전문가 협력체제;

원자력발전, 과학 및 공학 분야에서 미래 기술수요 및 성능요구조건을 고려할 때, 고중성자속 연구용 원자로의 최적설계 연구가 핵심사항이며 이를 위해 설계, 운전, 이용자 그룹의 전문지식을 총동원하고 상호 조화를 이루도록 유도하여야 한다.

하나로 이용자협의회, 운영위원회, 전문연구회, 등 외곽조직의 전문 인력을

활용하여 이용연구 분야의 장기 연구방향 및 실험설비 특성에 관한 정보 DB 시스템으로 구축하고 지속적으로 update하는 것이 필요하다. 하나로 운영부와 연구용 원자로공학부는 운영상의 현안문제를 해결하는 소극적 운영체제를 벗어나서 specialty engineering의 know-how를 체계화하는 기술력관리 system으로 나아가는 적극적인 운영체제로 진화하는 것이 필요하다.

c. 체계공학적 설계방법 도입;

미국 General Atomic의 TRIGA를 제외하면, 연구용 원자로사업은 생산제품의 판매와는 달리 수요자의 설계요구사항을 반영하여 설계, 공급하는 것이 전통적인 방법이다. 따라서 수주활동의 신뢰성 제고와 효율적 추진을 위해 수요자와 공급자 상호간의 기술적 및 비기술적 요건에 대한 의견수렴을 투명하고 종합적으로 하는 방법으로 요건공학 관리(Requirement Engineering Management) 체계의 도입이 효과적일 것이다.

이 체계는 결국 사업수주 후의 설계, 건설, 시운전단계에 이르도록 일관되게 유지, 활용, 개선 및 관리되므로 사업자요건의 추적성이 보장될 뿐만 아니라 불필요하거나 상충 또는 중복된 요구사항의 발생을 차단할 수 있다. 따라서 이로 인한 설계오류와 과다지출을 예방하는데 크게 기여할 것이다.

4. 연구용 원자로 수출 전략요소

원자력연구원은 하나로가 성공적으로 가동하기 시작한 1990년대 중반부터 이미 연구용 원자로의 수출가능성에 대해 관심을 갖고, 태국, 이집트, 호주, 등 세계 신규 연구용 원자로 수요국의 입찰에 캐나다의 AECL과 공동참여를 시도하여 왔다.

이 과정에서 다양한 정보를 수집, 분석하였으며, 국내 다른 국내 원자력산업체가 갖지 못한 연구용 원자로 시장동향 및 기술자료를 소장하고 있을뿐더러 경험 많은 기술 및 사업관리 인력을 보유하고 있기 때문에 누구보다도 통찰력 있는 수출전략을 개발할 능력이 있을 것을 확신한다. 따라서 본 연구에서 논의코자 하는 사항 중에는 상당부분이 이미 고려 또는 반영해본 것일 수 있을 것이다.

ㄱ. 전략 고려사항

연구용 원자로 수출도 다른 원자력사업과 유사하게 기술외적 요소가 중요하다. 또 비록 과거 50년 동안에 이룩한 기술발전으로 인해 연구용 원자로의 활용성 성능요건이 upgrade되었지만 중성자나 방사선을 이용하는 실험장치라는 기본 기능은 변하지 않았다. 따라서 다음의 수출전략 고려사항은 이러한 바탕 위에서 조사, 검토되었다.

a. 원자력의 부활과 연구용 원자로의 역할 및 수요 증대;

㉠ 연구용 원자로 역할의 패러다임 변화

원자력 초창기에서 연구용 원자로의 주된 역할이 인력양성을 위한 방사선 및 핵공학 기초교육과 연구, 핵연료 및 원자로재료 개발을 위한 재료시험이었지만, 그 후 원자력 산업의 정체 및 사양으로 신규인력 수요가 급격히 감소함에 따라 대학이나 연구기관이 운영하던 교육 및 훈련 목적의 연구용 원자로 수도 줄어들게 되었다.

따라서 비록 원자력발전산업이 다시 활력을 얻게 된다 하더라도 그동안 발전을 거듭하면서 축적된 원자력 이론 및 실험 자료, 혁신적인 컴퓨터 성능 및 기능 향상, 국제기구와의 협력을 통한 원자력기술의 개방 및 보편화 등을 고려할 때, 유사한 목적의 연구용 원자로 건조 필요성은 크게 회복되기 어려울 것이다. 단지 원자력을 경험하지 못한 개발도상국이 관심을 기울일 가능성은 여전할 것이다.

또한 방사선 및 중성자 환경에서 원자로 재료의 구조적 변화와 건전성 실증을 목적으로 활용되어 온 대형 재료시험로들은 Gen IV나 ITER가 요구하는 보다 극한적인 환경조건을 제공할 수 있는 고성능시험로로 업그레이드되어야 할 것으로 전망된다. 그러나 중간진입전략으로 빠른 기간에 원자력 발전 산업의 자립을 희망하는 중진국 가운데는 낙후된 기술력을 단기간에 높이는 도구로서 재료시험과 기술개발에 함께 활용할 수 있는 다목적 중대형 연구용 원자로를 선호할 것이다.

㉡ 수요규모와 개발투자의 형평성

앞서 논의한 바와 같이 비록 원자력산업의 부흥이 온다고 하더라도 연구용 원자로시장 규모가 획기적으로 확대될 가능성은 희박하다고 보는 것이 합리적이지만, 국가 원자력 외교정책, 원자력발전사업의 수출 등과 같은 거시적 관점에서 연구로의 수출은 국익에 도움이 클 것이다. 따라서 원자력연구원과 같은 비영리 연구기관과 첨단기술을 보유한 중소기업들이 컨소시엄을 형성하여 함께 부가가치가 높은 노형을 개발하고 해외시장으로 진출하는 전략이 수요규모와 기술개발 투자의 형평성을 유지하고, 불필요한 사업적 위험부담을 덜게 되는 방안이 될 것으로 본다.

b. 수요자 등급별 표준모델 기반 주문 설계;

앞서 살펴본 바에 따라 미래 연구용 원자로 시장은 단시일에 급격한 성장을 기대하기는 힘들지만, 불규칙하게나마 지속적인 수요가 예상된다. 이와 같은 시장특성을 감안한다면, 대규모 상용원자로 공급업체는 연구용 원자로 사업

참여에 적극적이지 않을 수 있고, 국가지원 아래 국공립연구기관이 주도할 가능성이 크다고 하겠지만 이러한 비영리연구기관들은 일반적으로 사업추진 및 관리체계가 수요자의 요구조건에 능동적으로 대처하는 능력이 미흡하다. 따라서 장기계획 아래 소규모 연구개발 프로그램을 통해 국가별 유형에 맞는 표준 모델의 기본설계를 갖추어 상품적 가치를 높이고 이를 기반으로 수요자 고유의 요구조건을 실시간으로 덧입혀간다면 좋은 인상을 줄 수 있다.

㉠ 선진국;

지금까지 원자력 과학 및 기술의 선도적 역할을 해온 원자력대국들은 대부분 10기 이상의 다양한 목적의 연구용 원자로를 개발 및 가동하면서 원자력발전 분야에서 고유기술력을 확보한 전력을 갖고 있다. 새로운 원자력시대에도 선진국들의 역할은 변함없을 것이지만 연구용 원자로의 수요는 물량보다는 질이 우선될 것이다. 그리고 투자효율성과 이용율을 높이는 방안으로서 지역협력체제 아래에서 공동 연구시설로서의 기능 및 성능 요건을 만족하도록 고성능 다목적 연구용 원자로를 선호할 것으로 예상된다.

㉡ 중진국;

주로 개발도상국 부류로부터 탈피과정에 있으며, 경제 성장 속도가 비교적 빠른 중진국들은 늘어나는 전력수요 증가와 온실가스 감축압력 문제로부터 벗어나기 위해 원자력의 의존도를 높이고, 안정적 공급을 보장하는 수단으로 원자력기술 국산화를 강력히 추진할 것이며, 이 경우 핵연료 및 재료시험이 가능한 다목적 중대형 연구용 원자로를 보유하기를 원할 것이다.

㉢ 후발국;

원자력 과학기술 분야의 연구개발이 상대적으로 낙후되었거나 국가의 경제 규모가 작아서 조기에 대규모 원자력발전사업을 추진하기는 시기상조지만, 장기적으로 에너지문제 해결에 원자력이 중요한 역할을 하게 될 국가들이 주 대상이다. 이런 부류에 속하는 국가들에게는 훈련 및 교육용 기능을 갖추고 건설비 및 운영비가 저렴한 소형 다목적 연구용 원자로가 불가피하겠지만, 기능 요구조건은 오히려 중대형 연구로에 가까울 가능성이 크다. 또 노화된 소형 연구로를 새로운 환경에 맞추어 재가동을 원하는 선진국이나 중진국의 출현이 기대되므로 소형 연구로(hardware)와 cyber 원자로(software)의 Symbiosis 연구로 개념을 고안하는 것도 고려해볼 가치가 있다.

c. 기술기준 및 인허가기준의 개선;

㉠ PRA 기반 및 주기적 안전성평가체제 적용;

규모나 운전조건이 상대적으로 덜 까다롭고, 연구시설에 대한 규제자 시각이

관대하기 때문에 지금까지는 세계적으로 연구용 원자로에 대한 안전기준 및 요건이 비교적 간단하고, 규제활동도 융통성이 컸다. 그러나 노화된 채 방치된 연구용 원자로의 수가 누적되고 수시출입을 허용할 수밖에 없는 연구시설의 특성상 대테러 방호에 취약한 점이 강조되면서, 연구용 원자로의 인허가 및 규제요건이 강화 되는 추세에 있다.

IAEA는 2004년 연구용원자로 안전성 수행규정에 이어서 2005년에 연구용 원자로 안전요건(No. NS-R-4)을 확정하므로 세계연구용 원자로의 안전성에 대한 규제 규격을 표준화하였다.

우리나라 원자력법규에는 연구용 원자로를 정의하고 있으나 특별히 연구용 원자로 인허가 및 규제만을 위한 별도의 기준은 없다. 특별히 PRA나 주기적 안전성평가와 같은 규제요건에 대해서는 발전용원자로의 규제요건을 준용할 수밖에 없는데, 이는 선진국들도 대동소이하기 때문에 참조할만한 외국사례도 드물다.

이러한 환경아래서 수출형 연구로의 안전기준은 IAEA의 권고를 따르는 것이 인허가 및 규제요건의 투명성을 높이고 인허가로 인한 사업의 리스크를 줄이는데 효과적일 것이다.

㉠ 기술중립형 연구용 원자로/실증로 통합인허가기준 대비

이와 더불어 Gen IV 발전로 규제제도의 시급성이 공감대를 형성하면서 미국을 선두주자로 새로운 기술중립형 규제체제를 개발하고 있다. IAEA도 유사하게 INPRO 프로그램을 추진하고 있기 때문에 동일한 규제요구조건이 개발될 것이다.

이들 미래형 원자력에너지시스템 개발 프로그램에서 공통적으로 논의되는 것이 실증로(prototype)의 건설이다. 그러나 실증로의 인허가나 규제기준이 특성상 연구용 원자로와 상용 발전로의 중간적 요소가 많기 때문에, 앞으로 안전규제에 관한 연구로, 실증로 및 발전로에 통일적으로 적용할 수 있는 기술중립형 안전규제체제를 갖추도록 요구할 가능성이 크다.

따라서 수출형 연구로의 안전성 설계는 기술중립형 통합 인허가제도에 대비한 안전성 및 인허가 요건을 기준하여 개발할 필요가 있다.

㉡. 수출전략요소;

a. 종합사업 및 기술 관리체계 수립:

연구용 원자로 수출 시 원자로 자체의 설계 능력 측면에서의 강점 외에도 도면상의 설계를 현실로 구현 가능한 건설 및 사업 능력을 포함하는 종합적인 체계도 평가의 잣대가 될 수 있다. 연구용 원자로 건설이 발전로에 비해 비용

이나 규모 면에서 상당히 작은 편이나 일반적인 프로젝트나 단일 혹은 두세 개의 팀에 의해 운용되기에는 무리가 있다. 현재 한국의 경우, 연구용 원자로 수출을 위해서는 원자로 및 이용설비의 개념개발은 한국원자력연구원이, 계통 설계 및 엔지니어링은 KOPEC이, 기기 설계 및 제작은 두산(중)이, 사업 관리는 건설회사 등 여러 기관이 힘을 합쳐야 제공 가능한 상황이다. 반면에 경쟁국가인 프랑스의 AREVA나 아르헨티나 INVAP 등은 한 회사에서 일괄 공급 체계를 갖추고 있으므로 여러 가지 측면에서 유리한 입장이다. 한편, 일반적으로 경쟁 입찰시 기준이 되는 reference plant가 있어 비용 절감이 수반되어 최적의 효과를 얻는 경우에도 입찰에만 통상적으로 30억 ~ 50억 원이 소요가 된다. 따라서 현재 같이 연구용 원자로 건설 시 업무 분야가 각각의 기관으로 분리되어 있는 현 상황의 경우 현실적으로는 입찰 비용조차도 사실상 조성하기 어려운 상황이다. 다행히도 네덜란드 PALLAS 입찰 사업을 통해 연구용 원자로 국제 시장 진출을 위한 산업체 포함 국내 기관의 협력약정이 체결되어 있으므로 잘 유지될 수 있도록 상호간의 신뢰가 구축되어야 할 것이다.

1995년과 2000년 한국원자력연구원은 AECL과 consortium으로 태국의 ONRC 연구용 원자로 건설사업과 호주 OPAL 연구로 건설사업 입찰에 참여하여 실패한 경험이 있다. 당시 연구원의 주 업무는 설계해석 및 시운전 분야로 제한되었기 때문에 수동적인 참여였으나, 연구용 원자로를 독자 수출하고 부가가치를 최대한 확보하기 위해서는 독자적인 사업추진 및 관리 종합체계의 확립 및 운영이 필요하다.

b. 국가별 맞춤형 전략 수립:

다른 상품들과 마찬가지로 연구용 원자로의 수출도 철저하게 수요자 기호에 맞추어져야 하며 계약 체결에 가장 효율적인 방법으로 접근해야 할 것이다. 네덜란드와 같은 기술선진국은 기술 및 성능, 가격, 사업 능력 등 종합적인 경쟁력 측면에서 접근해야 하는 반면 베트남, 태국 등 개도국은 의사결정에 영향을 주는 결정절차, 결정권자(공산당원 또는 왕족)와의 인적 관계, 관료적 절차와 관행 등 비기술적 요인들에도 비중을 두어야 한다. 즉, 선진국의 시장 진입을 위해서는 설계 능력의 입증, 기술 능력의 신뢰, 가격 및 비용의 합리성, 사업 체계의 우수성 등에 대한 홍보 능력을 갖추는 것이 중요할 것이므로 선진 마케팅 기법과의 접목을 고려해야 할 것이다. 특히 연구로의 품질 설명에는 상당 수준의 전문적 지식이 수반되므로 대개 홍보에 설계자나 기술자가 나서고 있다. 만약 경쟁 회사 혹은 국가와 차별성을 부각시키기를 원한다면

단기 마케팅 교육을 통해 전문 홍보요원들을 훈련하는 것도 효과적인 방안이 될 수 있다.

c. 원자력분야 연구지원 및 인력양성 프로그램 운영;

대학-대학, 대학-연구소, 연구소-연구소 사이의 인적 교류를 장려하고 우호적인 분위기를 만드는 것이 장기적인 관점에서 유리할 것이다. 특히 유력 인사들과의 접촉 및 관리는 조직적으로 이루어지는 것이 바람직하다. 현지 지명도가 높은 국내 기업을 활용하는 것도 연구용 원자로 수출에 한 방안이 될 것이다. 현지 진출 국내 기업들은 인적네트워크 및 현지 조직, 효과적 홍보 방안, 그리고 정서적 성향 등에 대해 많은 경험과 기반을 구축하고 있을 것이므로 활용할 수 있는 방안 강구가 필요하다. 즉, 문서로 나타낼 수 없는 문제들은 어느 국가도 쉽게 접근할 수 없으므로 현지 사정에 정통한 국내 산업체 또는 해당 지역 회사의 참여를 적극 요구해야 한다. 이를 위해서는 현지 건설 경험이 있는 산업체 등과 접촉하여 정보를 문서화 혹은 지속적인 교류를 장려하거나 필요시 관련 회사의 설립도 고려할 수 있을 것이다.

d. 경제 여건을 고려한 전략:

개발도상국의 경우 사회, 정치적 문제도 있지만 경제적 문제로 원자력 계획 일정이 지연되거나 변경되는 경우가 많다. 실례로 베트남은 연구용 원자로 건설 의지는 있으나 경제적 여건의 어려움으로 진행이 매우 느린 상태이며, 태국은 IMF로 인한 경제 사정으로 사업이 중단되었다. 따라서 개발도상국에서의 원자로 수요 확대와 시장 확보를 위해 상대국가의 여건에 적합한 연구용 원자로 사양 및 건설비용에 대한 재무적 지원 전략을 고려할 필요가 있다. 예로, 연구용 원자로 수출에 산업체가 참여하는 경우 대상국가와 물물교환 성격의 barter제 형식 거래가 가능할 것이며, 공동연구 형식으로 핵심 기술과 기기만 제공하고 건설 등 단순 노무는 상대국가에서 하는 방식도 비용 및 위험도를 감소시킬 수 있다는 면에서 하나의 방법으로 고려할 수 있다.

태국의 경우 최근까지도 원자력을 에너지 수급수단의 마지막 옵션으로 여겨왔으며, 우리나라의 소프트웨어 기술은 인정하나 하드웨어는 선진국을 선호하는 경향이 있으므로 시운전, 인력 교육 프로그램 등과 같은 비용 측면에서 위험도가 적은 부분의 기술 수출도 한 방안이 될 수 있다.

이러한 전략은 상대국 기술 수준과 경제적 능력에 따라 접근 속도 및 규모를 조절할 필요가 있다. 즉, 대상국의 기술 수준이 높고 경제적 능력이 갖추어진 경우에는 우리가 지니고 있는 모든 기술적 역량을 동원하면서 최적의 비용 대비 효율을 지닌 제품을 통해 경쟁사에 비해 신속하게 유리한 위치를 선점

하는 것이 중요한데 비해 경제적 규모가 작은 국가에 대해서는 규모에 맞는 제품 구성 및 재무적 건전성을 평가하는 것이 우선이 되어야 할 것이다.

e. 국가간 원자력협력 협정 체결:

원자로 수출에는 국가간 원자력 협력협정 체결이 선행되어야 한다. 당사국간 원자력 협력협정은 법률적으로 요구되는 것은 아니나, 국제 관례상 협정을 체결하고 있기 때문이다. 대개 경우 양국간 협력협정은 약 1~2년의 기간이 필요하므로 수출 가능성이 큰 경우에는 미리 체결함이 사업 진행에 도움이 되거나 사업 기간을 단축할 수 있는 효과가 있다. 참고로 2008년 1월 현재 한국과 원자력 협력협정이 체결된 국가는 미국을 비롯하여 캐나다, 스페인, 호주, 벨기에, 프랑스, 독일, 일본, 영국, 중국, 아르헨티나, 베트남, 터키, 러시아, 브라질, 체코, 우크라이나, 이집트, 칠레, 루마니아, 카자흐스탄의 총 21개국이고, 인도네시아와는 인도네시아 의회 승인만 남은 상태이다. 따라서 연구용 원자로 수출 가능성이 있는 태국과 네덜란드에 대해서는 진행 상황을 참작하여 적절한 시기에 양자간의 원자력 협력협정이 체결될 수 있도록 준비해야 할 것이다.

f. 발전로 또는 다른 산업 수출과 연계:

규모가 큰 발전로 및 타 산업 수출 시 협상 품목으로 연구용 원자로의 효용 가치를 부각시킬 수 있다. 특히 베트남과 같이 발전로와 연구로 모두에 관심을 가지고 있는 경우 발전로 입찰에 연구로의 제공과 연계할 경우 전략적인 우위를 점할 수 있다. 연구용 원자로와 연계하여 수출할 수 있는 조합 상품으로는 PET, 사이클로트론과 같은 의학 분야, 비파괴 검사와 같은 산업 분야, 연구용 원자로 해체 기술 (TRIGA 해체 경험) 등이 있다. 연구용 원자로 연계 수출 전략을 수립하기 위해서는 국내 각 기관별 정보 공유 및 연계 협력을 통해 연계 가능성과 경제성 분석 등이 수행되어야 하며 해당 국가에서의 수요 파악 등이 선행되어 맞춤형 조합을 이끌어 낼 수 있어야 한다.

특히 재정이 넉넉하지 못한 국가가 연구용 원자로를 제공받기를 원할 경우, 금융산업과 협력하여 진출하는 것이 경제적 위험부담을 더는 좋은 방법이 될 것이다.

g. 장기적 관점 시각 요구:

연구용 원자로는 규모가 작지만 원자력 발전소와 유사한 원자력 종합시스템이다. 원자력기술 수출은 작은 것부터 시작하여서 신뢰 축적을 통해 큰 목표 달성한다는 장기적인 관점을 유지할 필요가 있다. 예를 들면 교환 학생, 운전원 교육, 연구 인력 파견 등 직접적인 연구용 원자로 건설과 관계없는 부분을

장기적이고 지속적으로 수행함에 따라 우호 세력을 확보할 수 있고 기술의 의존도를 높일 수 있다. 지속적인 국제협력과 친분유지는 연구용 원자로 분야에서 기술적 신뢰도를 쌓는 가장 확실한 방법이다. 이는 결국 추후 연구용 원자로 건설 수요 발생 시 기술적 신뢰도 뿐 아니라 정서적 공감대를 형성하는데 매우 유리하게 작용할 것이다. 특히 연구용 원자로는 수요가 일정하지 않고, 수요 국가의 여건이 다르고, 수요 대상국이 제한적이다. 또한, 연구용 원자로는 규모가 작고, 설계 특성이 다양하므로 경쟁상대와의 차별성을 두드러지게 보여주기 어렵다. 따라서 정부 및 기관간의 협력 프로그램, 국제기구를 통한 협력 강화, 등 인적 네트워크를 통한 지속적인 유대관계 구축과 상대국 수요 일정을 감안한 기술협력 등이 효과적일 수 있다.

h. 핵비확산성 및 수출 통제:

핵확산우려 문제는 모든 원자력기술의 수출과 관련하여 기본적으로 부딪치게 되는 사안이다. 핵확산 금지의 강화를 목적으로 IAEA가 주축이 되어 국제사회에 통용되는 다양하고 엄격한 정책과 제도들이 마련되어 있다. 연구용 원자로의 수출 시 이러한 정책 및 제도들을 숙지하여 수출에 걸림돌이 되지 않도록 밑그림을 그려야 할 뿐 아니라 더 나아가 제도의 이점을 이용할 수 있는 방안을 고안해야 한다. 이들 각 정책과 협정 및 제도 등을 살펴보면 현재 수행되고 있는 상용 발전로의 개발 수준을 준수한다면 연구용 원자로의 국제거래에 저촉되지 않음을 알 수 있다. 다만 연구용 원자로의 경우 특수 목적의 기능을 충족하기 위해 상용로와 다른 물질이나 기기를 적용할 가능성이 높으므로 이들이 수출통제 물품에 포함되지 않도록 설계에 유의할 필요가 있다. 또한 각 국가 별로 통제 수준이 다르므로 설계 시 사용되는 기기 및 물질에 대한 리스트 작성을 통해 여러 지침에 저촉되는 일이 없도록 하는 것이 중요하다. 또 강화되는 통제 체계의 경향을 고려하여 추후 통제 물품에 포함될 가능성이 있는 제품을 설계시 지양하여 설계 변경이나 미래의 A/S에 대비해야 할 것이다. 그리고 수입국의 안전조치 및 물리적 방호사항 점검이 필요한데, 네덜란드, 베트남, 태국은 IAEA의 안전조치 협정국으로 특별하게 문제점이 발생할 가능성은 없을 것으로 판단된다.

국제적으로 운용 중인 핵확산방지 관련 정책 및 제도는 [부록 3]에 요약하여 수록하였다.

제 3 절 대상국가 접근 및 개발 전략

1. 수출 전략요소의 구현

ㄱ. 수요자 요구사항 QFD 개발;

연구용 원자료를 도입하려는 수요자의 일반 요구사항을 정확하게 이해하여 올바른 기술적 요구사항으로 변환하는 과정은 설계의 효율성뿐 아니라 사업 수주에 효용성이 크다. 과거에는 원자력기술에 대한 접근이 제한이 많아서 연구용 원자로 도입국의 기술적 요구사항이 공급자의 의견에 크게 영향을 받았으나, 현대에 이르면서 원자력기술의 상용화와 원자력안전의 공개성에 힘입어 수요자의 요구사항이 매우 구체적이다.

이러한 환경변화는 공급자로 하여금 수요자의 의사를 존중하여 설계에 효과적으로 반영토록 하는 기술을 요구하게 되어 자연스럽게 사업추진과 더불어 대상국가의 주요 의사결정 관련자와 상호방문, 서면질의응답, workshop, 등의 방법을 사용하여 일반 수요자 요건을 구체화하는 절차가 수반되고 있다. 본 연구에서는 이를 위해 QFD(Quality Function Deployment)체제의 활용을 제안하고 QFD Matrix 개발에 JAD(Joint Application Design) 방법을 도입할 것을 권고한다.

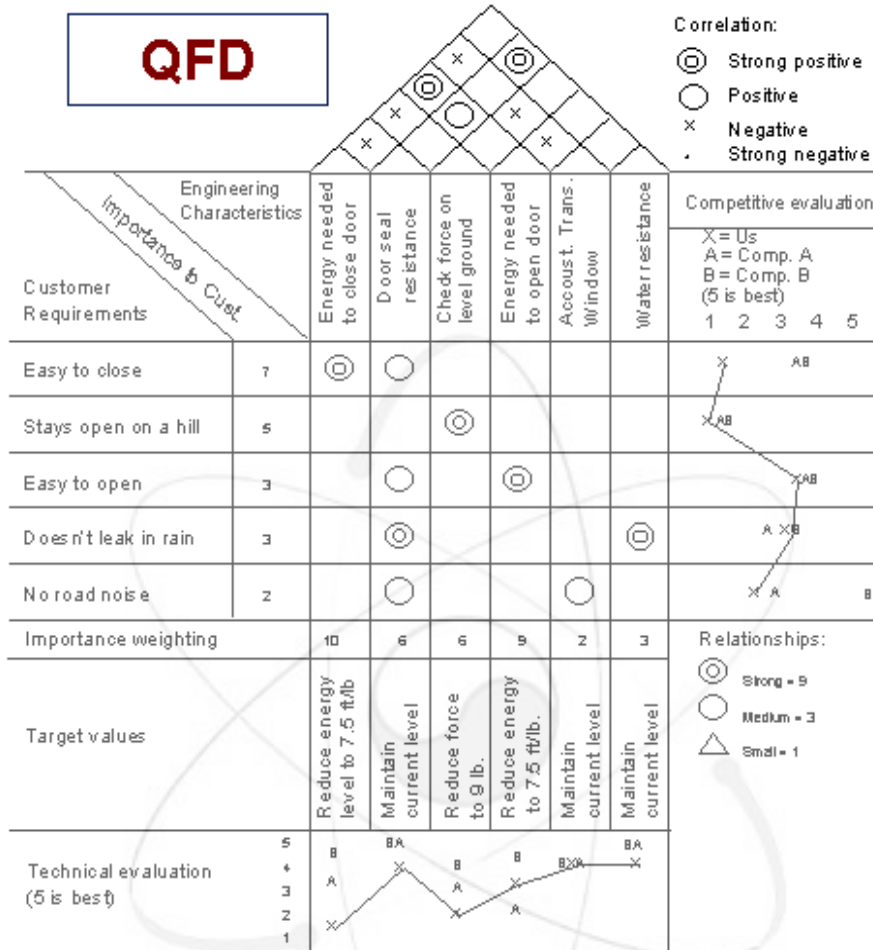
JAD는 흔히 software 개발사업에서 사용해온 방법인데 단기간에 공동으로 설계개념이나 설계요구조건을 확정하는데 매우 효과적이어서 개발기간이나 비용에 획기적인 단축을 가져다줄 뿐 아니라 사용자의 주인의식을 고양하여 개발자와 사용자의 유대관계를 강화하는데 기여한다는 평가를 받아왔다.

일반적으로 JAD는 workshop과 유사한 성격으로 진행되지만 짧은 기간에 중요한 문제에 의견일치를 보기 위해서는 사전준비는 물론 사후조치의 개연성을 확실히 하도록 기획되어야 한다. 즉 양측의 참여자의 범위, 협의 및 합의사항에 대한 명시, 회의 자료의 내용 및 서식, 등에 주의가 요구된다.

QFD는 1970년대 일본 자동차산업을 위해 개발된 품질관리방법으로서 수요자의 기대치를 설계특성으로 변환하는 도표체계로서 경쟁사에 대해 상대적으로 우수한 품질의 제품을 싼값에 제공하는데 괄목할만한 기여를 한 관계로 이후부터 제품의 생산을 넘어서 설계, 건설, 등 산업 전반에 확산된 품질관리기법으로서 [그림 3]에 예시된 바와 같이 좌측 Y-축에 수요자 요구사항과 우측 X-축에 설계에 반영된 기술적 요구사항 간의 상관 Matrix를 기본 골격으로 한다.

연구로 사업의 수요자는 최소한 원자력기술에 대한 기본적인 지식을 갖추고

있는 전문가 그룹이 중심적 역할을 하므로 수요자 요구사항을 3 단계로 세분하여 구체화할 필요가 있으며, 기술적 요구조건도 이와 대응되는 하위 수준까지 상세하게 분류하는 변형된 QFD Matrix를 개발하는 것이 바람직하다.



[그림 3] Quality Function Deployment 도표 예

a. 사전준비

모든 사업개발의 성공요소는 철저한 사전준비에 있다. 연구용 원자로사업도 여기서 예외가 될 수 없으며 오히려 원자력 기술개발 계획과 여건이 대상국가의 정치, 경제, 사회, 문화 등 제반 상황에 따라 크게 차별화되므로 더 많은 노력을 기울여야 할 것이다.

따라서 사업자는 문헌조사, 사용자 특징 DB 개발, 시장조사, 상황분석 모델, 등을 이용하여 지속적으로 대상국가들의 정보 수집, 분석에 관심을 두고, 정부의 적극적 지원 아래 다양한 국제학술대회를 통한 전문가집단간의 교류, 국가 및 기관간 협력 협정 체결과 구체적인 협력 프로그램 운영, 외교 채널을

이용한 홍보활동, 등 장기적 안목에서 발판을 마련하는 것이 과거 원자력 수출국들의 성공 시나리오이다.

b. 수요자 요구사항 QFD 개발을 위한 로드맵 작성

QFD 개발 로드맵은 연구용 원자로사업의 기획에 앞서 사업추진의 논리적인 기반을 마련하는 issue-driven 기획도구로서 사업 결정권자와 원만한 의사소통과 사업추진에 필요한 예산 확보를 위한 기반 자료를 제공할 목적으로 개발한다. 따라서 로드맵 개발절차는 일반적으로 해당 연구용 원자로 사업의 추진상 예상되는 문제를 정의하는 평가단계, 문제의 근본 원인을 분석하는 분석단계, 그리고 문제의 해법을 찾고 사업추진계획에 반영하는 해결단계의 3단계의 논리 구조로 작성하는데, 각 단계 별로 다시 세부단계를 분류하여 주요 활동사항을 작성한다.

주의할 점은 QFD 개발을 위한 로드맵은 본 사업의 성공적 수주를 위한 전략 요소이지, 연구용 원자로의 설계 개발을 위한 전략요소가 아니므로 수주 후에 진행될 기술적 및 사업관리적 문제에 집착할 필요가 없다는 것이다.

c. 수요자 요건 QFD 수목 완성;

연구용원자로의 수요자는 다른 일반 상품의 소비자와는 다르다고 하지만 여전히 요구조건을 직접 설계에 반영하기에는 대부분 포괄적이고 정성적일 뿐만 아니라 때로는 너무 의욕적이어서 추정 사업비 규모를 크게 초과하는 경우가 많다. 특히 수요자가 연구용 원자로이용자 그룹일 경우 후자의 가능성이 매우 크다. 따라서 사업을 수주하는 단계에서 상호간의 의견수렴이 전문 용어를 사용하는 예비 개념설계요건 수준의 상세한 수요자요건 QFD 수목을 개발하는 것이 좋다.

ㄴ. 설계개념 요건 Matrix 개발;

수요자의 기술적 요구사항을 원자로 및 실험설비의 설계개념 요건으로 변환시키는 의사수렴 과정으로서 이를 통해 수요자가 직접 참여하여 원하는 상품의 예비 개념설계를 만들므로 구매의사 결정을 촉진시키는 효과가 크다. 사업자는 경쟁상대자의 예상 노형에 대한 상세한 기술정보를 확보하고 있어서 설계개념 요건 매트릭스 개발 시에 수요자의 비교, 선택 옵션을 곧 바로 제공하므로 구매동기를 부여하고, 공급할 후보노형의 우수성을 확신시키는 기회로 활용한다.

ㄷ. 계통설계 요건 Matrix 개발;

일반적으로 상품의 주문자는 원하는 상품이 어떤 형상과 특성을 보일 것인

지에 대한 감각적인 호기심을 갖는다. 연구용 원자로라 할지라도 의사결정에서 정치적 영향력이 큰 원자력 산업에 속하기 때문에 전문가그룹의 확고한 이용연구계획과 더불어 사업관련 정부기관의 의사결정에 중요한 요소로서 원자로의 주요 계통들에 대한 특성과 형상에 대한 정보를 제공할 필요가 있다.

계통설계 요건 Matrix는 이러한 목적을 구체화함을 체계적으로 접근하는데 핵심이 되는 절차로서 앞서 도출된 설계개념요건 매트릭스로부터 계통개념설계로 나아갈 때, 요건의 synthesis와 기능분석을 병행하므로 최적화된 계통개념이 갖추어야할 설계요건들을 정리한 것이다.

ㄷ. 연구용 원자로 수요자 요구사항과 계통설계 요건의 타당성 검토;

실질적인 사업의 추진결정에 따라 착수되는 기본설계 업무가 원활하게 진행되기 위해서는 앞으로 설계될 연구용 원자로가 지금까지 공동으로 노력하여 도출해낸 개념이 원래의 수요자가 원했던 것과 일치하는지를 확인하는 과정이 반드시 필요하다. 즉 연구용 원자로 개념을 freezing하기 앞서 수요자의 정치적, 경제적, 기술적, 입지적 환경 여건과 활용계획의 구체성 등에 대한 정보를 배경으로 사업의 실현성 규모를 최종 결정하여야 한다.

연구용 원자로 수요자의 요구사항과 계통설계 요건의 타당성 검토는 이러한 목적으로 진행되는 절차이다.

2. 사업개발 조직 및 기능

연구용원자로사업이 상용 원자력발전사업과 다른 점은 입증기술과 첨단기술의 조화를 요구하는 준거대 복합 기술사업이라는 독특한 특성 때문에 나타나는 것들이다. 따라서 일정한 기술주기로 동일한 기술수준을 반복적으로 이용하는 발전로사업보다 수요자의 요구조건의 차별성과 미래성을 어떻게 기술요건으로 변환 하는데 기존의 기술체계와 산업구조를 활용하여 최대의 사업성과를 거둘 수 있도록 사업 조직과 기능을 분명히 정의하여야 한다.

체계공학관리이론은 미국 정부가 주도하는 군수산업과 우주산업의 기술개발사업을 효율적으로 추진하기 위해 정립한 학문으로서 기술관리와 사업관리를 통합하여 소기의 목적을 차질 없이 진행하는 최선의 방법으로 인정받고 있다. 연구용 원자로사업의 사업적 특징을 반영하는 효과적인 사업추진 조직 및 기능은 체계공학관리 개념을 도입하여 다음과 같이 갖춘다. [그림 4]에 연구용 원자로사업 계획을 효과적으로 개발하기 위해서 조직 체계를 제안하였다.

ㄱ. 체계공학팀(사업관리);

사업책임자가 추진대상 연구용 원자로사업의 품질·일정·비용을 종합적으로 고려한 가운데 신속하게 의사결정을 내릴 수 있도록 사업 진행 중에 생산되는 모든 정보를 수집, 정리, 분석, 평가, 종합, 관리하는 기능을 갖는다.

이 팀은 주로 2~3 명의 체계공학자로 구성되며, 필요에 따라 수시로 설계공학팀, 전문성공학팀 및 사업지원팀의 관련인원을 참여시킨다.

주요 업무는 사업제안서 작성, 기술관리, WBS(Work Breakdown Structure) 개발, 체계공학관리계획 수립 등이다.

ㄴ. 설계공학팀;

실질적인 설계자료를 생산하는 조직으로서 대상 연구용 원자로 및 실험시설을 설계하는데 필요한 공학분야에서 정부가 인증한 전문기술인력을 망라하여야 하며, 원자로물리, 열수리학, 기계구조, 전기공학, 제어계측, 방사선차폐, 토목건축, 등을 포함하는 것이 일반적이다.

그러나 연구용 원자로사업 하나를 위해 모든 인력을 확보, 유지, 관리하는 비효율적이므로 기관의 항시조직을 matrix로 이용하거나 외부의 유자격기술자를 임시로 활용하는 방안을 사용하고 있다.

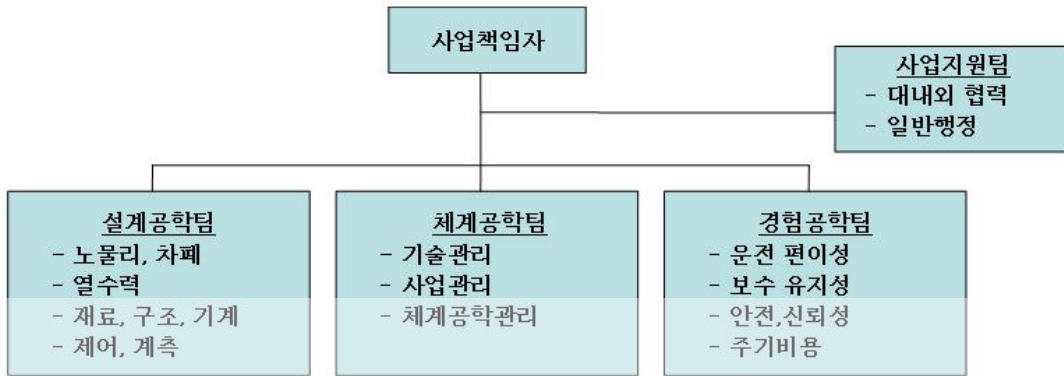
ㄷ. 전문성공학팀;

제공되는 연구용 원자로가 유용하게 이용되기 위해서는 수요자의 요건을 형상과 기능으로 변환시키는 설계개발이 단순히 요구되는 기능에 대한 성능을 내도록하는 것에 머무르지 않으며 소기의 실험목적을 달성할 때까지 지속적이고 안정적이며 경제성 있는 가동이 필수적이다.

전문성공학은 과거와 현재 추진한 유사사업에서 축적된 경험자료를 근거로 설계에 반영되는 설계요건을 다루는 분야이다. 대표적으로 수명주기비용, 신뢰도, 인간공학, 보수유지성, 운전성, 안전성, 시험성, 제작 및 시공성 등을 포함한다. 연구용 원자로사업에서는 신뢰성, 인간공학, 안전성; 운전성, 시험성 및 보수유지성, 제작 및 시공성; 수명주기비용의 4 분야 전문가로 구성하는 것이 적절할 것이다.

ㄹ. 사업지원팀;

기술문서를 포함하는 사업문서를 관리하고, 외자 및 구매에 관한 재무관리 업무를 담당하며, 정부를 포함하는 대외기관들에 대한 지원업무 등 제반 행정지원을 담당·주관하는 말한다.



[그림 4] 연구용 원자로사업 추진을 위한 사업개발 조직

3. Phase I (타당성) 연구개발

연구용 원자로의 수요자는 대개 정부, 연구계 및 학계로 구성된 범국가적 전문가 집단으로서 각 단위집단이 요구되는 주문사항을 모두 만족시키면서 사업을 이끌어 가는 것이 용이하지 않다.

QFD방법은 비전문가를 포함한 수요자 요구조건들을 수렴하여 최적의 설계요구조건으로 구현시키는 효과적인 도구로서 사업의 성공적 수주에 큰 도움이 될 것이다.

ㄱ. 연구용 원자로 수요자 요구사항 QFD 개발을 위한 기반 정보

- a. 연구용 원자로사업의 추진배경 및 필요성
- b. 연구용 원자로의 잠재 이용자 그룹 및 이용목적
- c. 이용자 그룹의 연구목표 및 범위
- d. 연구용 원자로 사업환경의 요구 및 제약조건

ㄴ. 최상위 등급 연구용 원자로 수요자 요건;

- a. 사업적 요건; 사업수행을 위한 수요자의 경제적, 제도적, 기술적, 사업적 환경을 파악하고 반영하려는 목적
- b. 기술적 요건; 수요자가 원하는 연구용 원자로의 설계, 건설 및 운전에 관련되는 품질기준, 기술기준, 안전기준 및 인허가기준을 파악하려는 목적
- c. 활용성 요건; 건조하려는 연구용 원자로의 활용목적을 수요자로부터 구체적으로 도출하기 위한 항목들로서 일반적으로 연구용 원자로를 이용한 원자력 기술 교육 및 훈련, 동위원소 생산 및 연구, 방사화분석, 중성자 beam 이용연구, 소재 개발 및 재료시험 분야로 크게 구분할 수 있다.

- d. 기타 외적 요건; 추진하려는 연구용 원자로사업에 영향을 미칠 것으로 예상되는 국내정책 (예를 들면 원자력개발 및 원자력산업육성 중장기계획), 국제외교(예를 들면 국제 핵확산금지협약, 원자력의 평화적 이용을 위한 지역협력체제)와 관련하여 고려할 필요가 있는 문제를 정리한다.

ㄷ. 하위 등급 수요자 요건 개발 QFD template;

a. 사업적 요건;

	2 등급	3 등급
사업적 요건	재원 지원	총사업비 규모
		외국 차관 범위 및 조건
	법적 제도	원자력법규체제
		원자력안전규제체제
		산업 codes & standards
	부지 여건	지형 및 기후
		지반구조 및 지진이력
		수자원 환경
		교통 및 접근성
	기술지원 요건	설계·건설·시운전 기술지원
		사업관리 및 인허가 지원
		운전인력 훈련
	사업추진체제	turn-key
		공동설계 개발

b. 기술적 요건;

	2 등급	3 등급
기술적 요건	품질 요건	품질기준 요건
		품질보증계획 요건
		품질관리체계
	기술기준 요건	기술기준 기반
		유효 기술기준 범위
		상세기술지침 수준
	안전기준 요건	안전원칙 및 목표
		방사선 안전기준
		원자로시설 안전기준
	인허가 요건	연구용 원자로 인허가 법규
		연구용 원자로 설계·건설 인허가 절차
		가동중 연구용 원자로 규제요건

c. 활용성 요건;

	2 등급	3 등급
활용성 요건	원자력 교육	대학교과 실험교육
		산업인력 실습훈련
		국제 원자력 인력양성 프로그램
	동위원소 생산 및 연구	방사성 동위원소 수급 계획
		hot cell 설비 요건
		최종제품 특성요건
	방사화 분석	예상 응용분야 및 범위
		분야별 연관 산업의 요구사항
		설비요건
	중성자 빔 이용	예상 활용분야 및 수준
		냉/온 중성자원
		중성자 radiography
소재 개발 및 재료 시험	개발대상 소재 및 재료의 방사화 특성요건	
	중장기 핵연료개발 계획	
	예상 재료시험 종류 및 규모	

d. 기타 외적 요건;

	2 등급	3 등급
기 타 외 적 요 건	국내정책 요건	국산화 정책
		연계산업 활성화정책
		중장기기술개발 정책
	국제외교 요건	NPT
		IAEA TWGRR, IGORR, 등
		연구용 원자로이용 지역협력 프로그램
	기타	대국민 수용성
		기타

4. 수요자 요건에 대응하는 설계개념 요건 개발 QFD

ㄱ. 설계개념 요건 개발을 위한 기반 정보;

위의 방법으로 도출한 상세 수요자요건을 최적 반영한 설계개념 요건을 계통설계의 개념으로 변환시키기 위해 다음과 같은 정보를 수집하여 조사, 분석, 평가하는 연구 활동이 요구된다.

- a. 연구용 원자로 건설 후보부지
- b. 연구용 원자로의 기능 및 성능 목표
- c. 연구용 원자로 운영의 제약조건
- d. 예상 실험설비의 규모 및 범위
- e. 이용자 그룹의 규모 및 전문성 수준
- f. 인터페이스 현황 및 예상, 등

나. 수요자 요구사항과 연구용 원자로 설계개념 최상위 요건 QFD

		연구용 원자로 설계개념 요건				
		기능 설계요건	성능 설계요건	안전 설계요건 및 방호	부지 설계요건 및 환경	전문성 설계요건
수요자 요건	사업적 요건	×	△	○	○	×
	기술적 요건	○	△	△	○	△
	활용성 요건	△	○	×	×	×
	기타 외적 요건	×	×	○	△	○

비고) 상관성; ○ 높음, △ 중간, × 약함

다. 설계개념 요건 세분화 template;

a. 기능 설계요건;

	2 등급	3 등급
기능설계 요건	노내 조사시험 요건	실험프로그램 및 목표
		실험방법 및 범위
		실험규모 및 제약조건
	노외 조사시험 요건	실험프로그램 및 목표
		실험방법 및 범위
		실험규모 및 제약조건
	동위원소 생산 및 제조 요건	핵종별 주요 생산 및 공급 요건
		핵종별 비방사능 요건
		핵종별 제조설비 요건
	중성자 beam 활용실험 요건	실험 프로그램 및 목표
		spectrometer 종류 및 수량
		중성자속 요건

b. 성능 설계요건;

	2 등급	3 등급
성 능 설 계 요 건	출력 특성요건	원자로 출력
		quality factor 요건
	중성자속 특성요건	중성자에너지 스펙트럼 요건
		중성자속 공간분포 요건
	핵연료 특성요건	농축도
		최대연소도
	노내 실험장치 요건	공간적 요건
		방사선 특성 요건
	노심관리 요건	연료교체주기 요건
		연료장전 pattern 요건
	운전 특성요건	플랜트 제어원리
		man-machine interface 요건
	안전 특성요건	고유 안전특성 요건
		설계 안전특성 요건

c. 안전 및 방호 설계요건;

	2 등급	3 등급
안전 및 방호설계요건	안전 목표 및 기준	일반 원자력안전 목표
		방사선 방호 목표
		기술적 안전 목표
	안전 개념 및 원칙	심층방어 요건
		안전기능
		허용기준 및 설계방법
	일반 안전요건	설계 안전요건
		건설 안전요건
		운영 안전요건
	기술기준 요건	codes & standards
		품질보증 요건
	물리적 방호 요건	다중 방호구역 구분기준
대 테러 방호기준		

d. 부지 및 환경 설계요건;

	2 등급	3 등급
부지 및 환경설계요건	부지 평가 기준	부지 활용 계획
		지반 안정성 요건
		지진, 홍수 및 해일 이력
		주변 공장, 공항, 등 위험시설
	기상조건	기온 변화
		풍속 및 풍향 기준
		강우 및 강설량 기준
	수자원 환경	용수 공급원 요건
		지하수 분포
	운송체계	해상 수송체계
		육상 수송체계
		항공 수송체계

e. 전문성 설계요건;

	2 등급	3 등급
전문성 설계요건	보수유지성 요건	보수유지 계획 요건
		가동중 검사 요건
		예비부품 요건
	인적요소 요건	인간공학적 설계 요건
		인적오류 요소
	수명주기 요건	수명관리 계획 요건
		수명주기 비용 평가
	지원성 요건	보급지원 요건
		훈련 및 교육 프로그램
		보조장비 및 시설 요건
	신뢰도공학 요건	신뢰도 목표 및 기준
		신뢰도 설계 요건

5. 개념설계 요건으로부터 계통 설계개념 개발 QFD

앞 절에서 도출된 개념설계 요건을 만족하는 최적의 설계개념을 제시하는 것은 결국 지금까지의 수요자와 공동 노력이 맺을 결실을 보여주는 것인 동시에 앞으로 함께 개발해 가고자하는 제품의 사양을 선택하는 첫 과정이 된다. 따라서 수요자 요건들이 어떻게 반영되고 있는지를 추적할 수 있도록 QFD 방법을 따르는 것이 필요하다.

ㄱ. 연구용 원자로 개념설계 요건-대-계통 개념설계 QFD 매트릭스;

		계통 설계개념							
		핵연료	원자로계통	공정계통	보호안전계통	실험설비	격납건물	부대건물	부지
개념설계 요건	기능 설계요건	△	○	○	○	○	△	×	×
	성능 설계요건	○	○	○	○	○	△	×	×
	안전 및 방호 설계요건	○	○	△	○	△	○	×	△
	부지 및 환경 설계요건	×	×	△	×	×	○	×	○
	전문성 설계요건	△	○	○	○	△	△	△	△

비고) 상관성; ○ 높음, △ 중간, × 약함

이 방법에 따라 개발된 계통설계개념 옵션들은 가능하면 연구용 원자로플랜트 핵심계통의 일반 구성체계를 따르되 계통의 옵션별로 고유한 특성과 형상을 상상할 수 있도록 구체적이고 실체적으로 제공되어야 한다.

ㄴ. 연구용 원자로 주요 계통 분류 범위;

- a. 핵연료계통; 개념설계 요건을 만족하는 핵연료 옵션의 형상, 구조 및 물성을 기술하며, 서로의 장단점을 비교할 수 있는 데이터 포함.
- b. 원자로계통; 원자로의 노심과 실험설비를 위한 실험공의 규모, 형상, 구조 및 성능 요건을 포함하며, 동시에 원자로를 중심으로 형성되는 냉각계통, 제어장치, 반사체 계통 등 주변시설에 대한 설계개념의 옵션들을 제시함.
- c. 공정 및 계측제어계통; 2차 냉각계통을 비롯한 기타 공정계통들과 플랜트 운전과 관련된 제어 및 계측계통, 전기계통의 옵션별 특성을 기술함.
- d. 보호 및 안전계통; 제어계통과 구별하여 원자로를 안전정지상태로 유지하기 위한 운전정지계통, 잔여열제거(필요하면)를 위한 비상냉각계통, 원자로실을 격리시키는 비상환기계통을 포함.
- e. 실험설비 및 보조계통; 원자로 주변에 설치되는 실험설비들을 구동하고 운영하는 데 필요한 제어설비, 데이터처리장치 및 utility 공급계통, 등을 예시함.
- f. 격납건물계통; 사고시 방사성물질의 외부누출을 차단하고 불손세력에 의한

도난 및 파괴로부터 원자로를 보호하는 목적의 원자로격납건물 및 격리설비의 설계개념을 기술함.

- g. 부대건물 및 지원시설; 냉중성자실험동, 조사채시험동, 동위원소재조설비, 등 특별한 실험설비와 관련된 부대건물을 필요로 하는 경우에 해당됨.
- h. 부지; 연구용 원자로는 발전로와 달리 연구장비 및 시료의 수송, 또한 연구인력의 접근이 원활하도록 교통이 편리한 도심 부근이 적절하여 대부분 연구기관이나 대학 내에 건설되어온 점을 고려할 때, 특별한 옵션보다는 주변의 utility의 필요충분조건을 명시하는 수준이 적절함.

ㄷ. 계통 설계개념-대-계통 설계요소 개념 matrix;

- a. 핵연료 계통 설계요소 개념;

	2 등급	3 등급
핵연료 계통	핵연료물질	금속핵연료
		화합물핵연료
		가연성독물
	단위형상	봉형
		관형
	핵연료 물성	농축도
		우라늄 밀도
	집합체	단일봉
		봉상 집합체
		관상 집합체

b. 원자로계통 설계요소 개념;

	2 등급	3 등급
원자로 계통	원자로 설계개념	pool type
		tank type
		tank-in-pool type
	노심 설계개념	노심집합체
		노심격자
		제어봉 구동 메카니즘
	반사체 개념	고체반사체
		액체반사체
	실험공 개념	수평 시험공
		노내 수직시험공
		노외 수직시험공

c. 원자로건물계통 설계요소 개념;

	2 등급	3 등급
원자로건물 계통	건물 개념	containment
		confinement
	원자로실 개념	floor 개념
		중간 층 개념
		surface
	공정계통 배치 개념	제어실
		주기기실
	시험설비 연계 개념	실험장비 배치설계
		방사화물질 취급개념
		보조 및 지원설비

6. Phase I (타당성연구) 보고서 작성

본 항목은 뒤에 기술할 수요자 친화 및 관리전략에서 사업계획 및 설계 공동개발 체제 방식을 따를 때, 사업착수 이전에 수요자에게 제공되는 문서이다. 따라서

turn-key 방식의 사업추진 경우에는 필요하지 않을 수 있다.

ㄱ. 보고서의 성격;

예비 개념설계 수준으로 어떻게 수요자 요구사항이 설계요구사항으로 발전되었는가를 추적하므로 수요자가 장차 보유하게 될 연구용 원자로의 사업성, 기술성 및 활용성의 윤곽을 확인할 수 있는 정보를 포함한다.

ㄴ. 보고서 목차 및 내용;

a. 서론;

연구용 원자로사업의 목적 및 범위, 배경정보, 국가 중장기 원자력 연구개발 계획과 관계, 연구용 원자로시설의 일반사항, 주요 시설별로 제공되는 선택옵션의 선정기준, 등을 기술한다.

b. 안전성 목표 및 엔지니어링 설계요건; 연구용 원자로의 안전성 목표는 IAEA의 안전설계 문서에서 요구하는 원자력일반, 방사선방호 및 기술적 안전성 목표와 수요국의 규제 기준체계에 해당 연구용 원자로의 개념 및 잠재 후보부지 요건을 어떻게 반영할 것인가를 기술한다. 특히 안전성 설계기초 차원에서 심층방어원리, 안전기능, 설계허용한계 등 연구용 원자로의 설계에 적용되는 일반설계요건들을 논의한다.

엔지니어링 기술기준은 계통·기기·구조물의 분류체계, codes & standards 및 설계기준의 선정과 필요에 따라 cutoff date를 명시한다.

c. 부지 및 환경; 연구용 원자로의 부지 및 환경 특성은 정산운전이나 사고 시에 배출되는 방사성물질로 인한 종사자 및 주민의 안전성과 밀접한 관계가 있으므로 수요자의 안전규제제도와 연관하여 논의되어야 한다. 특히 지진, 홍수, 태풍과 같은 잠재후보 부지에서 자연발생적인 사건의 빈도 및 심도를 논의하며, 항공기 경로나 화학공장의 폭발, 등 가능한 인위적 사건에 대해서도 언급되어야 한다.

d. 건물 및 구조; 방사성물질의 감금요건에 따라 confinement와 containment로 분류하며 미래 연구용 원자로는 보다 엄격한 격리기준을 따르도록 내진등급의 격납건물을 선호하지만 수요자가 국내법규를 근거로 선택할 수 있도록 옵션으로 제공하므로 사업의 재정 규모에 대한 이해를 도울 것이다.

e. 계통; 핵연료계통, 원자로계통, 공정 및 계측제어계통, 보호 및 안전계통 및 전원 계통, 등 연구용 원자로 플랜트를 구성하는 주요 공정 및 안전계통에 대해 지금까지 개발된 설계요건-대-설계요소 개념을 바탕으로 옵션별 장단점

을 논의한다.

- f. 실험설비계통; 연구용 원자로의 활용성요건으로부터 도출된 실험분야와 성능요건을 만족하도록 갖추어야 할 실험장비 및 설비계통을 설치 우선순위에 따라 기술한다. 특별히 동위원소 생산, 냉중성자 이용, 핵연료 및 재료시험의 경우 규모가 큰 부속시설과 실험공간을 필요로 하므로 별도의 실험동 개념을 논의하는 것이 합당하다. 원자로 주변 또는 노심 내에 설치될 장치들은 인터페이스 요건을 반드시 포함하여야 한다.
- g. 운영관리; 대체적으로 연구용 원자로의 핵연료교체주기는 수십일 정도로 발전소에 비해 매우 짧다. 원자로 운영은 각종 실험의 특성상 반드시 일정기간을 연속적이고 안정적인 중성자속을 제공할 수 있도록 실험계획과 가동계획의 조화를 요구한다. 본 항에서는 연구용 원자로의 운영조직과 이용조직의 상보성을 강조하는 조직체계 옵션을 권고하고 경제성과 안전성이 보증되는 핵연료관리, 시설보수유지, 품질관리, 인력훈련 방안을 문서관리체계와 더불어 제시한다.
- h. 기타; 시운전 프로그램, 운전원 훈련 프로그램 및 수명주기 관리 프로그램과 같은 연구용 원자로가 건설된 후를 대비한 수요자 편이사항을 구체적으로 제시한다면 공급자의 신뢰를 높이는 데 도움이 크다.

7. 수요자 친화 및 관리 전략 시나리오 옵션

앞서 논의한 일련의 QFD 논리는 여기서 기술되는 연구용 원자로 잠재수요자의 친화 및 관리 전략 시나리오를 실행하는 과정에서 약간의 변형 적용이 불가피하므로 사업추진팀은 이에 대한 적절한 방안을 개발해야 할 것이다.

ㄱ. 수동적 방법; 다단계 입찰전략

현재 KAERI가 힘을 쏟고 있는 PALLAS 프로젝트의 주관국인 네델란드가 채택한 추진전략으로써 수요자가 연구용 원자로에 관한 기술능력이나 활용경험이 우수함에 반해 어떤 이유에서든 외부에 사업을 위탁하고 owner로서의 역할만을 담당하려는 의도 아래에서 고려되는 방법이다.

이 경우 수요자는 사업계획단계에서부터 공급자의 기술 및 관리능력을 조기에 판단하고, 수요자의 특수한 요구조건을 구체적이고 정확하게 반영한 후에 사업을 추진하므로 효율적인 사업계획을 할 수 있다는 장점이 있으나 반면에 상당한 준비기간과 비용 및 인력의 사전투입이 요구되는 단점도 있다.

반면에 공급자는 turn-key 계약이 갖는 책임과 권한이 함께 주어지므로 상대방에 의해 야기되는 불확실성이 적지만 상대적으로 사업추진과정에서 환경변화에 따른 대비책 마련에 융통성이 작기 때문에 예기치 못한 위험부담이 크고 자체오류에 대한 전적인 책임을 져야하는 사태가 발생할 수 있다. 따라서 사업개발계획과정에서 엄격한 자기진단과 적합한 개선을 통해 사업진행에 대비하는 충분한 위기관리 능력을 확보하는 것이 중요하다.

ㄴ. 능동적 방법; 사업계획 및 설계의 공동개발 전략

이 전략은 우리나라가 하나로를 개발, 건조할 때, 채택한 사업추진전략으로서 주로 원자력기술자립에 대한 확고한 의지가 있고, 원자로시설의 설계, 건설 및 운영기술 수준이 상당한 국가들을 대상으로 할 때, 효과적이다.

우리나라의 경우를 돌이켜 보면 일찍이 TRIGA 계열의 소형 다목적연구용 원자로 운영을 통해 연구용 원자로의 특성에 대한 효용성과 한계에 대한 충분한 이해를 갖추고 있었고, 발전로 핵연료국산화 및 설계기술 자립의 필요성이 고조되고 있던 1983년 제5차 경제개발 5개년계획의 과학기술 분야 핵심기술과제로서 다목적연구용 원자로 국산화계획에 대한 본격적인 논의가 시작되었다.

당시 수행된 연구보고서에는 “한국원자력연구소가 원자로계통의 설계를 책임지고 수행하되 국내 산업체가 적극 참여하여 원자력기술의 국내 축적을 꾀하고 시행착오를 최소화하기 위해 외국에서 건설 중이거나 계획 중인 연구용 원자로 가운데 참조노형을 선정하고 공동개발에 참여하는 추진방안”을 제시하였다.

이러한 추진전략은 곧 당시 MAPLE 연구용 원자로 개념개발을 계획하던 캐나다 AECL과 공동으로 사업계획 및 설계개발을 착수하는 협약을 맺음과 동시에 Phase 별 work scope를 정의하고 milestone을 결정하였으며, 추진과정에서 주기적으로 공동사업 검토회의를 개최하여 상호 cross check를 통해 위험부담을 줄일 수 있는 협의체를 운영하였다.

이 경우 수요자의 우발적인 환경변화로 인한 불확실성이 그대로 사업진행에 반영되므로 사업개발에 앞서 예비인력과 재원을 운용할 수 있는 체제를 마련해야한다.

ㄷ. 선도적 방법; 전문가 훈련지원 프로그램 제공 전략

일반적으로 원자력기술에 대한 경험이 부족한 수요자를 대상으로 추진되어 온 전략으로 우리나라의 경우 SMART 사업이 좋은 사례이다. SMART 개발 초기에 잠재 도입국으로 관심을 갖던 인도네시아를 비롯한 아랍권 국가

의 기술자들을 초빙하여 설계 및 안전해석 이론과 실습에 대한 훈련프로그램을 제공하므로 시스템에 대한 이해를 높이고 지속적인 관심을 갖도록 유도하였다.

비록 아직 결정적인 결실은 없지만 이로 인해 IAEA와 같은 국제기구에서 SMART에 대한 우호적인 분위기를 확고히 할 수 있었으며, 국제원자력시장에서 지명도를 높이는 효과를 가져와 미래 원자력 수출산업의 선두주자로서 기대를 모으고 있다.

다른 한 예로서 영광3,4호기 설계참여도 이와 유사한 경우로서 수요자 입장이었던 공급자였던 미국의 C/E는 한국시장에서 확고한 위치를 차지하였고 우리나라 또한 이 기회를 통해 원전설계기술자립 조기달성이라는 눈부신 성과를 거두므로 win-win 전략의 성공사례가 되었다.

그러나 이러한 전략은 사업결정권이 일방적으로 수요자에게 의존되기 때문에 최종 단계까지 사업성패에 대한 불확실성이 남는다는 문제가 있으므로 지속적이고 치밀한 수요자 관리가 필요하다.

8. Phase II (공동개념설계) 개발 준비

ㄱ. 요건관리 및 형상관리 플랜 개발;

설계요건 및 형상설계의 지속적 관리 및 반영을 점검하기 위한 문서화 방법으로 요건관리 및 형상관리체계의 확보는 연구용 원자로사업의 효율적이고 효과적인 추진을 위한 표준방법을 제공한다는 점에서 가치가 크고, 미래 연구용 원자로사업의 관리체제를 선진화한다는 점에서 의의가 있다.

형상상관이라 함은 연구용 원자로의 개발, 설계, 건설 및 운영의 전주기에 걸쳐 기술적 및 경영적 관점에서 주요 관리가 요구되는 사항들의 기능, 성능 및 물리적 상태를 기록·관리하므로 이러한 특성들의 변화와 변경을 감독하고, 관련 기술문서들을 개정하는 후속조치를 통해 설계 당시에 설정한 요구사항들이 지켜지고 있음을 추적, 관리하는 기술체계이다.

반면에 요건관리는 수요자의 요구사항으로부터 발전된 설계개념 요구사항, 계통설계 요구사항, 시공 및 제작 요구사항, 운전 및 보수유지 요구사항, 등 일련의 요구사항 체계를 지속적이고 일관되게 관리하므로 연구용 원자로사업 수명기간 동안 분산되거나 오류 발생을 예방하기 위한 기술체계이다.

Phase I 과정에서 개발된 수요자요건-대-설계개념 요건의 QFD matrix를 바탕으로 상용 CM & REQ software를 사용하여 요건관리 및 형상관리체

계를 상호 연계되게 설계하기 위해 체계공학 전문가를 포함시키는 것이 효과적이다.

ㄴ. 설계해석 코드체계 개선 및 검증;

제안된 연구용 원자로 개념 옵션들을 대상으로 지금까지 갖추어놓은 노심 및 계통설계 코드 체계의 점검을 위한 검증계산을 수행한다. 이러한 시뮬레이션을 통해 생산되는 설계 및 운전 특성 데이터로부터 계통설계 및 운전조건 envelope, 운전절차 및 운전 환경의 확인, 예상사고 및 비정상상태의 예측하므로 운전성능요건을 정비한다.

여기에 필수적인 코드시스템은

- a. 로물리 설계해석 코드시스템
- b. 열수력 설계해석 코드시스템
- c. 기계구조 설계해석 코드시스템
- d. 방사선차폐 설계해석 코드시스템
- e. 안전해석 코드시스템
- f. 신뢰도분석 코드시스템을 포함한다.

ㄷ. 요건분석 시뮬레이션 논리 개발;

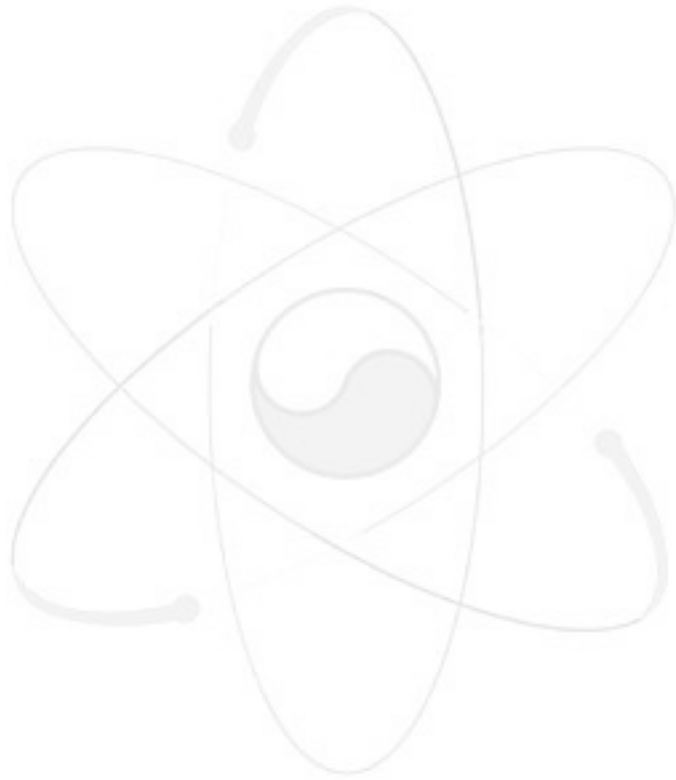
요건분석은 수요자요건으로부터 도출한 기능, 성능, 안전·방호, 부지·환경 및 활용성의 상위 설계요건들을 실제 연구용 원자로 계통, 기기 및 구조에 대해 개념설계, 기본설계 및 상세설계 단계에서 개발, 사용되는 수준의 하위요건으로 세분화 또는 상세화하는 과정으로서 설계요건의 추적성과 최적성을 투명하게 해주므로 설계요건의 잘못 적용으로 발생하는 오류를 예방하는데 도움이 크다

이러한 과정에 설계요건을 만족하는 성능요소와 계통요소의 synthesis가 요구되므로 다양한 시뮬레이션이 필요하며, 이를 위해 표준화된 절차 및 논리 체계가 제공되어야 한다.

요건분석을 통해 얻게 되는 성과 정보는 설계 대상 연구용 원자로의 계통, 기기 및 구조물이 갖는

- (ㄱ) 설계 특성; 기능, 성능, 용도, hardware/software 기능 인터페이스, 성능한계, 인터페이스 요건, 특수 hardware/software, 등
- (ㄴ) 운전 특성; 계통설계 및 운전조건, 운전절차, 운전환경, 예상사고 및 비정상상태, 운전성능요건, 이용자 및 보수유지 업무 정의, 운전조직, 계통간 및 조

직간 인터 페이스, 등
을 들 수 있다. 일부터 설계개선 분야 및 권고사항을 도출한다.



제 3 장 결론 및 권고사항

연구용 원자로 해외수출을 위한 전략을 개발, 분석, 평가, 권고하는 당초의 연구목적에 맞추어서 지금까지 논의해온 내용을 다음과 같이 정리하였다.

1. GHG(Green House Gas) 과잉배출로 인한 지구온난화 문제와 장기간에 걸친 유가불안정 과도로 세계 원전시장이 새로운 전기를 맞고 있다. 여기에서 대부분 70년대 건설된 2세대 원전의 설계수명 도달로 인한 수명연장, 중국과 인도 등 아시아에서 불기 시작한 3세대 원전의 신규 건설 및 미래형 제4세대 원자력에너지시스템의 국제 공동개발 등 원자력계 내부에서부터 변화의 동력이 제공되고 있다. 이러한 안팎의 환경변화는 바로 새로운 원자력기술연구의 필요성을 환기시켜서 연구용 원자로 수요에도 전환점으로 작용하고 있다. 그러나 현재 각국이 가동 중인 연구용 원자로의 대부분은 연령이 30년 이상 된 낡은 것이고 성능이나 시설면에서 새로운 연구환경이 요구하는 구비조건을 만족시키기엔 미흡하므로 새로운 연구용 원자로의 개발 또한 활성화될 것을 기대하고 있다.

2. 우리나라는 AECL과 공동연구를 통해 1995년 하나로 가동을 시작하였으나, 설계 후 긴 시간이 흘렀고 연구용 원자로 핵심 기술에 대한 다양한 경험이 상대적으로 부족하다. 특히, 하나로는 봉형 핵연료를 사용하기 때문에 전 세계적으로 많이 사용하는 판형 핵연료의 원자로 구조에는 기술적으로 취약한 부분이 있다. 또한 2000년대 초 활용성을 목표로 정한 다목적 성능요건은 미래 혁신기술 개발을 위한 고성능 연구용 원자로의 수요자 요건들을 만족하기에는 제한이 예상된다. 또 AREVA와 INVAP은 연구·개발 부분과 엔지니어링 및 사업관리를 하는 일관된 조직체계를 갖추어 turn-key 사업에 대한 시너지 효과를 발휘할 수 있으나, 한국은 연구개발, 설계, 제작, 사업관리 등 각 분야가 다른 기관으로 분리되어 사업추진 효율성 면에서 불리한 위치에 있다.

3. 본 연구는 이러한 내외적 환경에서 국내 연구용 원자로 기술이 갖는 취약점을 보완 및 개선할 수 있다면 최근 동남아시아 국가들의 원자력발전에 대한 관심이 고조되어 있고, 연구용 원자로 건설에 의욕이 높은 점을 고려할 때, 지리적 문화적으로 경쟁국들과 상대적으로 유리한 입장에 있는 우리나라가 좋은 결과를 얻을 수 있을 것이라는 기대를 가지고, 연구용 원자로의 수출요소를 재평가하여 수출사업화 방안을 모색하고, 수출전략을 수립할 목적으로 수행하였다. 그러나 신뢰성 있는 연구결과를 도출하기 위해서는 무엇보다도 현재 갖고 있는 연구용 원자로기술이 수출상품으로서 잠재적 경쟁력을 평가할 수 있도록 국내 주요 협력기관이 보유하고 있

는 기술능력의 D/B가 마련되어 있고, 체계공학적 설계 및 관리체계를 갖춘 상호협력체제가 구축되어 있는 것이 바람직하다.

4. 본 연구를 통해 확인한 연구용 원자로 수출전략 고려사항은 먼저 시대에 맞는 연구용 원자로의 역할과 함께 수요·공급의 균형관점에서 노형과 용량이 평가되어야하므로 수요자 등급별 표준 모델을 기본사양으로 실수요자의 주문 요건을 공동연구를 통해 확정하여 반영하는 접근 방법이 경쟁력 관점에서 효율적이라는 것이다. 특별히 새로운 시대에 맞는 기술기준과 인허가기준을 확보하고 건설에 따르는 안전규제 지원업무를 제공하도록 준비하는 것이 필요하다. 따라서 연구용 원자로 적용 PRA기법 개발, 주기적 안전성평가제도의 도입, 연구용 원자로와 실증로의 통합인허가 기준을 제시할 수 있는 역량을 갖추어야할 것으로 판단된다.

5. 수출전략 요소로서 고려할 사항은 초기부터 사업 및 기술관리 종합체계를 수립하므로 일관된 사업추진 동력을 갖추고, 수요자의 경제여건, 기술능력, 인력수준, 등을 고려한 연구용 원자로 요구사항을 효과적으로 수렴하도록 맞춤형 전략을 사용하는 것이 가장 중요하다. 또 양국 간 원자력협정, 국제협력기구, 등 외교적 창구의 활용을 최대로 살리고, 다른 수출산업과 연계하여 범국가적인 참여를 유도한다면, 연구용 원자로수출사업에 국한되지 않고, 발전로의 수출 기회도 증가할 것이다. 그러나 북한의 핵문제로 인해 핵비확산 및 수출통제에 민감한 반응을 보이는 국제 환경을 고려하여 투명하고 안전한 사업개발 전략을 수립하여야할 것이다.

6. 맞춤형 설계 전략을 구현하는 방법으로서 수요자요건을 설계요건으로 변환시켜 설계에서 건설, 운영 및 폐기에 이르기까지의 기술수명동안 추적성을 최대로 관리하는 체계공학방법을 도입하는 것을 제안하였으며, 요건관리 실행기법으로서 QFD(Quality Function Deployment)를 개발하였다. 또한 사업기획단계에서 이러한 방법을 효율적으로 적용할 수 있는 사업조직을 제안하였다.

7. 비록 연구용 원자로 수출사업을 착수하는데 필요한 모든 준비가 완벽하게 되었어도 궁극적으로 수요자의 구매동기를 환기시키기 위한 의사교류의 문을 여는 것이 중요하다. 본 연구는 수요자 진화 및 관리전략으로서 수요자주도의사가 확고한 경우의 수동적인 방법, 수요자와 협력을 중요시하는 능동적인 방법, 그리고 수요자의 요구조건이 거의 없는 경우의 선도적 방법을 선택적으로 적용하도록 권고하였다.

8. 마지막으로 사업 수주 후를 대비하여 준비해둘 필요가 있는 분야로서 요건관리 및 형상관리 플랜 개발을 권고하며, 수요자요건에의 맞춤형 설계가 되기 위해서는 설계요구사항을 신축적으로 반영할 수 있는 설계해석 코드체계와 요건분석 시뮬레이션 논리체계를 개발하고, 검증하는 것이 중요하다.

특히 양적으로나 질적으로 국제 연구용 원자로 시장은 크지 않고, 수요자의 요구 사항이나 환경이 수요자 마다 서로 상당히 상이하기 때문에, 연구용 원자로 수출을 위한 해외시장 개발 사업은 상용 발전로 수출사업과 다른 전략을 구사할 수밖에 없다. 예를 들면,

1. 사업개발 초기에는 산업체보다 원자력 분야에 특화된 국가지원연구기관이 앞서 이끌어 가므로 실수요자인 상대국가의 원자력 연구기관과의 동질성을 바탕으로 신뢰구축에도 유리하며,

2. 원자로, 핵연료, 실험시설을 package로 다룰 뿐만 아니라 대부분 폐로사업과 부지복원사업이 전제조건으로 요구되는 경우가 보편적일 것이므로 사업개발 조직에 참여할 인력이 연구원이나 기술자 중심이 되어야 하며,

3. 사업성의 근거가 가시적인 경제적 이득보다 국제기술외교와 같은 포괄적이고 장기적인 효과가 더 클 것이므로, 국가기관의 적극적인 관심과 지원이 필수적으로 요구된다.



참고자료

1. 한국원자력연구소 연구보고서, 연구용원자로 폐로사업, KAERI/RR-2099/2000 (2001)
2. 한국원자력연구소 연구보고서, 연구용 원자로 현황 및 설계 특성, KAERI/AR-657/2002 (2002)
3. 한국원자력연구원 연구보고서, AHR과 OPAL의 노심 특성 비교, KAERI/TR-3624-2008 (2008)
4. IAEA Safety Standards, Safety of Research Reactors, No. NS-R-4, 2005
5. C. D. West, Research Reactors - An Overview, CONF-970649-9, ORNL 97-3927/mhr, 1997
6. James A. Lacy, Systems Engineering Management, McGraw-Hill, Inc., 1992
7. <http://hanaro.kaeri.re.kr/>
8. <http://www.iaea.org/worldatom/rpdb/>
9. National report of the Kingdom of the Netherlands for Nuclear safety convention, April, 2005.
10. Invitation to tender, 2007S 186-226734, Aug. 13, 2008.
11. Tender guideline- tender phase version, Aug. 13, 2008.
12. Description of the projet products and planning, Dutch center for nuclear radiation, June 7, 2007.
13. Thailand budget for nuclear plant studies, <http://www.wonuc.org/>, Nov. 20, 2007.
14. Thailand nuclear program, <http://www.wonuc.org/>, July. 1, 2008.
15. Private communication with TINT staff.
16. 2020년 베트남 원자력 개발 장기 계획, 2006. 1.
17. 원자력 개발 장기 계획 action plan, 2007. 7.
18. D. P. Le, International cooperation in the Field of Nuclear Energy in Vietnam, KNS spring meeting, 2008.
19. <http://hanaro,kaeri.re.kr/>
20. Anita Blumenthal, Eric Lindeman, Handbook: the international nuclear fuel cycle, 1995.
21. 소동섭, 민경식, 김병구, “국내 원자력 수출제도의 효율적 개선방안”, 97 춘계 원자력 학회, 1997.
22. 류재수, 이병욱, 양맹호, 이한명, “원자력 산업에서 국제 수출 통제 체제에 대한 동향 및 대응방안”, 2004 춘계 한국기술혁신학회, 2004.

부록 1. 세계 연구용 원자로 현황

Country	Facility name	Thermal power, steady [kW]	Age (Critical date) / the basic day : 2008.08.01.	Purpose	Note
Algeria	ES-SALAM	15,000.00	16 years 6 months (1992.02.07.)	Test	
Algeria	NUR	1,000.00	19 years 4 months (1989.03.24.)	Research	
Argentina	RA-0	0.01	43 years 7 months (1965.01.01.)	Education (training)	
Argentina	RA-1 ENRICO FERMI REACTOR	40.00	50 years 6 months (1958.01.20.)	Research	
Argentina	RA-2	0.03	Shutdown (1966.07.01.~1983.09.01.)	Education (critical assembly)	
Argentina	RA-3	5,000.00	40 years (1968.08.01.)	Research	
Argentina	RA-4 (EX. SUR-100)	0.00	36 years 7 months (1972.01.01.)	Education (training)	
Argentina	RA-6	500.00	25 years 10 months (1982.09.23.)	Research	
Argentina	RA-8	0.01	Shutdown (1997.06.17.~)	Education (critical assembly)	
Australia	CF	0.00	Shutdown (1973.03.01.~1975.09.01.)	Education (critical assembly)	Decommissioned
Australia	HIFAR	10,000.00	Shutdown (1958.01.26.~2007.01.30.)	Research	
Australia	MOATA	100.00	Shutdown (1961.04.01.~1998.05.01.)	Research	
Australia	OPAL	20,000.00	2 years (2006.08.12.)	Research	
Austria	ASTRA	10,000.00	Shutdown (1960.09.24.~1999.07.29.)	Research	
Austria	SAR-GRAZ	10.00	Shutdown (1965.05.17.~)	Education (training)	
Austria	TRIGA II VIENNA	250.00	46 years 5 months (1962.03.07.)	Research	
Bangladesh	TRIGA MARK II	3,000.00	21 years 11 months (1986.09.14.)	Research	
Belarus	IRT-M MINSK	4,000.00	Shutdown (1962.04.01.~1988.01.01.)	Research	Decommissioned
Belgium	BR-02, POWER MOCKUP OF BR2	0.50	Shutdown (1959.12.01.~1993.03.01.)	Education (critical assembly)	
Belgium	BR-1	4,000.00	52 years 3 months (1956.05.11.)	Research	
Belgium	BR-2	100,000.00	47 years 1 month (1961.06.29.)	Test	
Belgium	BR-3	40,900.00	Shutdown (1962.08.29.~0987.06.30.)	Prototype reactor	
Belgium	THETIS RR-BN-1	250.00	41 years 4 months (1967.04.07.)	Research	
Belgium	VENUS	0.50	44 years 3 months (1964.04.30.)	Education (critical	

				assembly)	
Brazil	ARGONAUTA	0.20	43 years 6 months (1965.02.20.)	Education (training)	
Brazil	IEA-R1	5,000.00	50 years 11 months (1957.09.16.)	Research	
Brazil	IPEN-CNEN, SAO PAULO	0.10	19 years 9 months (1988.11.09.)	Education (critical	
Brazil	IPR-RI	100.00	47 years 9 months (1960.11.06.)	assembly) Research	
Bulgaria	IRT-SOFIA	2,000.00	Shutdown (1961.09.01.~1989.07.13.)	Research	
Canada	CNF	0.00	Planned	-	
Canada	MAPLE 1	10,000.00	Under construction	-	
Canada	MAPLE 2	10,000.00	Under construction	-	
Canada	MNR MCMASTER UNIV	5,000.00	49 years 4 months (1959.04.04.)	Research	
Canada	NRU	135,000.00	50 years 9 months (1957.11.03.)	Research	
Canada	NRX	42,000.00	Shutdown (1947.07.22.~1993.03.30.)	Research	
Canada	PTR	0.10	Shutdown (1957.11.01.~1990.10.05.)	Research	
Canada	SDR-SLOPOKE DEMO	2,000.00	Shutdown (1987.07.15.~1993.06.15.)	Prototype reactor	Decommissioned
Canada	SLOWPOKE, ALBERTA	20.00	31 years 3 months (1977.04.22.)	Research	
Canada	SLOWPOKE, SASKATCHEWAN	20.00	27 years 5 months (1981.03.01.)	Research	
Canada	SLOWPOKE-2, HALIFAX	20.00	32 years 1 month (1976.07.08.)	Research	
Canada	SLOWPOKE-2, KANATA	20.00	Shutdown (1984.06.06.~1989.04.01.)	Research	
Canada	SLOWPOKE-2, MONTREAL	20.00	32 years 3 months (1976.05.01.)	Research	
Canada	SLOWPOKE-2, OTTAWA	20.00	Shutdown (1971.05.14.~1984.01.01.)	Research	
Canada	SLOWPOKE-2, RMC	20.00	22 years 11 months (1985.09.06.)	Research	
Canada	SLOWPOKE-2, TORONTO	20.00	Shutdown (1971.06.05.~1998.12.31.)	Education (training)	Decommissioned
Canada	WR-1	60,000.00	Shutdown (1965.11.01.~1985.05.17.)	Research	
Canada	ZED-2	0.20	47 years 11 months (1960.09.01.)	Research	
Canada	ZEEP	0.00	Shutdown (1945.09.01.~1970.10.10.)	Education (critical assembly)	Decommissioned
Chile	RECH-1	5,000.00	32 years 10 months (1974.10.13.)	Research	
Chile	RECH-2	2,000.00	Shutdown (1972.12.01.~1989.09.06.)	Research	
China	CARR	60,000.00	Under construction	-	
China	CFER	65,000.00	Under construction	-	
China	HFETR	125,000.00	28 years 7 months (1979.12.27.)	Test	

China	HFETR CRITICAL	0.00	Shutdown (1979.06.20.~?)	Education (critical assembly)	
China	HTR-10	10,000.00	7 years 7 months (2000.12.21.)	Test	
China	HWRR-II	15,000.00	49 years 11 months (1958.09.01.)	Research	
China	MJTR	5,000.00	17 years 5 months (1991.03.02.)	Research	
China	MNSR IAE	27.00	24 years 5 months (1984.03.10.)	Research	
China	MNSR-SD	33.00	19 years 3 months (1989.05.01.)	Research	
China	MNSR-SH	30.00	16 years 8 months (1991.12.18.)	Research	
China	MNSR-SZ	30.00	19 years 9 months (1988.11.01.)	Research	
China	NHR-5	5,000.00	19 years 9 months (1989.11.03.)	Prototype reactor	
China	PPR PULSING	1,000.00	18 years (1990.08.01.)	Research	
China	SPR IAE	3,500.00	43 years 7 months (1964.12.20.)	Research	
China	SPRR-300	3,000.00	29 years 1 month (1979.06.28.)	Research	
China	TSINGHUA UNIV.	1,000.00	43 years 10 months (1964.10.01.)	Research	
China	ZERO POWER REACTOR	0.00	Shutdown (1966.01.01.~1983.01.01.)	Research	
China	ZPR FAST	0.05	38 years 1 month (1970.06.29.)	Research	
Colombia	IAN-R1	100.00	43 years 6 months (1965.01.20.)	Research	
Czech Republic	LR-0	5.00	25 years 8 months (1982.12.19.)	Education (critical assembly)	
Czech Republic	LVR-15 REZ	10,000.00	50 years 10 months (1957.09.24.)	Research	
Czech Republic	SR-0	1.00	Shutdown (1971.01.01.~1992.01.01.)	Research	Decommissioned
Czech Republic	TR-0	0.30	Shutdown (1972.01.01.~1980.10.10.)	Education (critical assembly)	Decommissioned
Czech Republic	VR-1 VRABEC	5.00	18 years 5 months (1990.03.12.)	Education (training)	
DPR Korea	IRT-DPRK	8,000.00	43 years (1965.08.15.)	Research	
DR Congo	TRICO I	50.00	Shutdown (1959.06.06.~1970.06.29.)	Research	
DR Congo	TRICO II	1,000.00	36 years 4 months (1972.03.24.)	Research	
Denmark	DR-1	2.00	Shutdown (1957.08.15.~?)	Education (training)	
Denmark	DR-2	5,000.00	Shutdown (1958.12.18.~1975.11.01.)	Research	Decommissioned

Denmark	DR-3	10,000.00	Shutdown (1960.01.16.~2000.09.28.)	Research	
Egypt	ETRR-1	2,000.00	47 years 6 months (1961.02.08.)	Research	
Egypt	ETRR-2	22,000.00	10 years 8 months (1997.11.27.)	Research	
European Union	ESSOR NUCLEAR PLANT	43,000.00	Shutdown (1967.03.19.~1983.06.27.)	Test	
Finland	FIR-1	250.00	46 years 4 months (1962.03.27.)	Research	
Finland	FI-0002	0.00	Shutdown (1963.07.30.~1975.01.01.)	Education (critical assembly)	Decommissioned
Former Yugoslavia	RA	6,500.00	Shutdown (1959.12.28.~1984.08.01.)	Research	
Former Yugoslavia	RB	0.00	50 years 3 months (1958.04.29.)	Education (critical assembly)	
France	CABRI	25,000.00	45 years 7 months (1963.01.01.)	Test	
France	CESAR	10.00	Shutdown (1964.12.01.~1977.08.01.)	Education (critical assembly)	Decommissioned
France	EL-3	18,000.00	Shutdown (1957.01.01.~1979.01.01.)	Test	Decommissioned
France	EL-4	267,000.00	Shutdown (1966.12.01.~1985.07.30.)	Prototype reactor	Decommissioned
France	EL-2	2,000.00	Shutdown (1952.01.01.~1965.01.01.)	Test	
France	EOLE	0.10	42 years 8 months (1965.12.02.)	Education (critical assembly)	
France	HARMONIE	1.00	Shutdown (1965.08.01.~1996.01.01.)	Research	
France	HFR	58,300.00	37 years 1 month (1971.07.01.)	Research	
France	ISIS	700.00	42 years 3 months (1966.04.28.)	Research	
France	MARUS	0.40	Shutdown (1960.01.01.~1983.04.01.)	Education (training)	
France	MASURCA	3.00	41 years 8 months (1966.12.01.)	Education (critical assembly)	
France	MELUSINE	8,000.00	Shutdown (1958.07.01.~1988.06.30.)	Research	
France	MINERVE	0.10	48 years 10 months (1959.09.29.)	Education (critical assembly)	
France	MIRENE	0.00	Shutdown (1975.01.01.~1988.12.31.)	Test	Decommissioned
France	NEREIDE	500.00	Shutdown (1960.09.15.~1982.01.01.)	Research	
France	ORPHEE	14,000.00	27 years 8 months (1980.12.19.)	Research	

France	OSIRIS	70,000.00	41 years 11 months (1966.09.08.)	Research	
France	PEGASE	30,000.00	Shutdown (1963.04.01.~1974.01.01.)	Test	
France	PHEBUS	40,000.00	30 years (1978.08.09.)	Test	
France	PHIENIX	563,000.00	34 years 11 months (1973.08.31.)	Electricity producing	
France	PILE AZUR	0.10	46 years 4 months (1962.04.09.)	Education (critical assembly)	
France	PROTOTYPE ADV BOILER	120,000.00	Shutdown (1975.11.24.~1996.01.01.)	Electricity producing	
France	RAPSODIE	40,000.00	Shutdown (1963.01.01.~1983.04.15.)	Electricity producing	
France	REACTOR JULES HOROWITZ	100,000.00	Planned (2008.01.01.)	-	
France	SCARABEE	100,000.00	Shutdown (1982.01.01.~?)	Test	
France	SILENE	1.00	34 years 7 months (1974.01.01.)	Research	
France	SILOE	35,000.00	Shutdown (1963.03.18.~1997.12.01.)	Research	
France	SILOTTE	100.00	Shutdown (1964.02.01.~1985.01.01.)	Research	Decommissioned
France	STRASBOURG-CRONENBOURG	100.00	Shutdown (1966.11.22.~)	Education (training)	
France	TRITON	6,500.00	Shutdown (1959.06.29.~1982.01.01.)	Research	
France	ULYSSE	100.00	Shutdown (1961.07.27.~?)	Education (training)	
France	ZOE (EL-1)	100.00	Shutdown (1948.12.01.~1974.01.01.)	Research	
Georgia	IRT-M TBLISI	8,000.00	Shutdown (1959.10.01.~1990.10.10.)	Research	
Germany	ADIBKA (L77A)	0.10	Shutdown (1967.03.18.~1972.10.30.)	Research	Decommissioned
Germany	AEG NULLENERGIE REAKTOR	0.10	Shutdown (1967.06.01.~1973.01.01.)	Education (critical assembly)	Decommissioned
Germany	AKR	0.00	30 years (1978.07.28.)	Education (training)	
Germany	ANEX	0.10	Shutdown (1964.05.01.~1979.03.01.)	Test	Decommissioned
Germany	BER- I	50.00	Shutdown (1958.07.24.~1972.12.02.)	Research	Decommissioned
Germany	BER- II	10,000.00	34 years 8 months (1973.12.09.)	Research	
Germany	FMRB	1,000.00	Shutdown (1967.10.03.~1995.12.01.)	Research	
Germany	FR-2	44,000.00	Shutdown (1961.03.07.~1981.12.21.)	Test	
Germany	FRF-1	10.00	Shutdown (1958.01.01.~1970.01.01.)	Research	Decommissioned
Germany	FRF-2	1,000.00	Shutdown (1977.10.01.~1983.01.01.)	Research	Decommissioned
Germany	FRG-1	5,000.00	49 years 9 months (1958.10.23.)	Research	
Germany	FRG-2	15,000.00	Shutdown (1963.03.15.~1993.06.01.)	Test	Decommissioned

Germany	FRH	250.00	Shutdown (1973.01.31.~1997.01.01.)	Research	
Germany	FRJ-1 (MERLIN)	10.00	Shutdown (1962.02.24.~1985.03.22.)	Research	
Germany	FRJ-2 (DIDO)	23,000.00	45 years 9 months (1962.11.14.)	Research	
Germany	FRM	4.00	Shutdown (1957.10.31.~2000.07.28.)	Research	
Germany	FRM II	20,000.00	4 years 5 months (2004.03.02.)	Research	
Germany	FRMZ	100.00	43 years (1965.08.03.)	Research	
Germany	FRN	1,000.00	Shutdown (1972.08.23.~1982.12.01.)	Research	Decommissioned
Germany	KAHTER	0.10	Shutdown (1973.07.02.~1985.01.01.)	Education (critical assembly)	Decommissioned
Germany	KEITER	0.00	Shutdown (1971.06.15.~1982.01.01.)	Education (critical assembly)	Decommissioned
Germany	KNK II	58,000.00	Shutdown (1971.01.01.~1991.08.23.)	Prototype reactor	
Germany	MZFR	58,000.00	Shutdown (1965.09.29.~1984.05.03.)	Prototype reactor	Decommissioned
Germany	NS OTTO HAHN	38,000.00	Shutdown (1968.08.26.~1979.03.22.)	Prototype reactor	Decommissioned
Germany	PR-10, AEG PRUEFREAKTOR	0.18	Shutdown (1961.01.01.~1976.01.01.)	Research	Decommissioned
Germany	RAKE	0.01	Shutdown (1969.10.01.~1997.11.26.)	Research	Decommissioned
Germany	RFR	10,000.00	Shutdown (1957.12.16.~1991.06.27.)	Research	
Germany	RRR	1.00	Shutdown (1962.12.16.~1991.09.25.)	Research	Decommissioned
Germany	SAR	1.00	Shutdown (1959.06.01.~1968.01.01.)	Research	Decommissioned
Germany	SNEAK	0.00	Shutdown (1966.12.01.~1985.11.01.)	Education (critical assembly)	Decommissioned
Germany	STARK	0.01	Shutdown (1963.01.01.~1976.03.01.)	Research	Decommissioned
Germany	SUR AACHEN	0.00	42 years 10 months (1965.09.22.)	Education (training)	
Germany	SUR BERLIN	0.00	45 years 1 month (1963.07.01.)	Education (training)	
Germany	SUR BREMEN	0.00	Shutdown (1967.10.10.~1997.06.06.)	Education (training)	Decommissioned
Germany	SUR DARMSTADT	0.00	Shutdown (1963.09.01.~1989.11.01.)	Education (training)	Decommissioned
Germany	SUR FURTWANGEN	0.00	35 years 4 months (1973.03.28.)	Education (training)	
Germany	SUR HAMBURG	0.00	Shutdown (1965.01.06.~1997.01.01.)	Education (training)	
Germany	SUR HANNOVER	0.00	36 years 8 months (1971.12.09.)	Education (training)	
Germany	SUR KARLSRUHE	0.00	Shutdown (1966.03.07.~1996.11.25.)	Education (training)	Decommissioned
Germany	SUR KIEL	0.00	Shutdown (1966.03.29.~1997.12.11.)	Education (training)	
Germany	SUR MUNICH	0.00	Shutdown (1962.02.01.~1981.08.10.)	Education (training)	Decommissioned

Germany	SUR STUTTGART	0.00	44 years 3 months (1964.04.24.)	Education (training)	
Germany	SUR ULM	0.00	42 years 8 months (1965.12.01.)	Education (training)	
Germany	TRIGA HD I	250.00	Shutdown (1966.08.01.~1977.03.01.)	Research	
Germany	TRIGA HD II	250.00	Shutdown (1978.02.28.~1999.09.01.)	Research	
Germany	ZLFR	0.01	Shutdown (1979.05.25.~?)	Education (training)	Decommissioned
Ghana	GHARR-1	30.00	13 years 8 months (1994.12.17.)	Research	
Greece	DEMOKRITOS	5,000.00	47 years 1 month (1961.07.27.)	Research	
Greece	GR-B SUBCRITICAL ASSEMBLY	0.00	37 years (1971.08.04.)	Education (critical assembly)	
Greece	NTU	0.10	Shutdown (1970.10.10.~1988.01.01.)	Education (critical assembly)	
Hungary	BUDAPEST RES. REACTOR	10,000.00	49 years 4 months (1959.03.25.)	Research	
Hungary	NUCL. TRAINING REACTOR	100.00	37 years 7 months (1971.01.01.)	Education (training)	
Hungary	ZR-6M	0.00	Shutdown (1972.11.28.~1990.12.31.)	Education (critical assembly)	Decommissioned
India	APSARA	1,000.00	52 years (1956.08.04.)	Research	
India	CIRUS	40,000.00	48 years 1 month (1960.07.10.)	Research	
India	CRIT. FACILITY FOR AHWR AND 500 MW PHWR	0.10	Under construction (2003.10.01.)*	-	* Criticality date
India	DHRUVA	100,000.00	23 years (1985.08.08.)	Research	
India	FBTR	40,000.00	22 years 10 months (1985.10.18.)	Test	
India	KAMINI	30.00	11 years 9 months (1996.10.29.)	Research	
India	PURNIMA	0.00	Shutdown (1972.05.01~1983.01.01.)	Education (critical assembly)	Decommissioned
India	PURNIMA II	0.01	Shutdown (1984.05.10.~1986.06.15.)	Education (critical assembly)	Decommissioned
India	PURNIMA-III	0.00	Shutdown (1990.09.11.~1993.07.31.)	Test	Decommissioned
India	ZERLINA	0.10	Shutdown (1961.01.01.~1983.01.01.)	Education (critical assembly)	Decommissioned
Indonesia	GA SIWABESSY MPR	30,000.00	21 years (1987.07.29.)	Research	
Indonesia	KARTINI-P3TM	100.00	28 years 6 months (1979.01.25.)	Research	
Indonesia	RIP	10,000.00	Planned	-	

Indonesia	TRIGA MARK II, BANDUNG	2,000.00	43 years 10 months (1964.10.19.)	Research	
Iran	ENTC GSCR	0.00	16 years 7 months (1992.01.01.)	Education (training)	
Iran	ENTC HWZPR	0.10	13 years 2 month (1995.06.01.)	Education (critical assembly)	
Iran	ENTC LWSCR	0.00	16 years 7 months (1992.01.01.)	Education (training)	
Iran	ENTC MNSR	30.00	14 years 5 months (1994.03.01.)	Research	
Iran	TRR	5,000.00	40 years 9 months (1967.11.01.)	Research	
Iraq	IRT-5000	5,000.00	Shutdown (1967.01.01.~1991.03.01.)	Research	
Iraq	TAMMUZ-2	500.00	Shutdown (1987.03.01.~1991.03.01.)	Research	
Israel	IRR-1	5,000.00	48 years 2 months (1960.06.16.)	Research	
Israel	IRR-2	26,000.00	44 years 8 months (1963.12.01.)	Test	Unverified information
Italy	AGN 201 COSTANZA	0.02	38 years 6 months (1960.02.12.)	Education (training)	
Italy	GALILEO GALILEI RTS-1	5,000.00	Shutdown (1963.04.04.~1980.03.07.)	Research	Decommissioned
Italy	L-54 M	50.00	Shutdown (1959.11.20.~1979.07.27.)	Education (training)	Decommissioned
Italy	LENA, TRIGA II PAVIA	250.00	42 years 9 months (1965.11.10.)	Research	
Italy	RANA	10.00	Shutdown (1965.02.15.~1981.01.01.)	Research	
Italy	RB-1	20.00	Shutdown (1962.07.01.~1982.02.10.)	Research	
Italy	RB-2	10.00	Shutdown (1963.05.28.~1980.12.31.)	Research	
Italy	RB-3	0.10	Shutdown (1971.08.09.~1989.11.20.)	Research	
Italy	RITMO REACTOR (RC-4)	0.01	Shutdown (1965.07.08.~1978.01.01.)	Education (critical assembly)	Decommissioned
Italy	ROSPO 2	0.20	Shutdown (1960.10.10.~1975.01.01.)	Education (critical assembly)	Decommissioned
Italy	RSV TAPIRO	5.00	37 years 4 months (1971.04.04.)	Research	
Italy	SM-1 SUBCRITICAL ASSEMBLY	0.00	Shutdown (1961.01.01.~?)	Research	
Italy	STRUTTURA SOTTOCRITICA	0.00	Shutdown (1962.01.01.~1977.11.11.)	Research	Decommissioned
Italy	TRIGA RC-1	1,000.00	48 years 2 months (1960.06.11.)	Research	
Jamaica	UWI CNS SLOWPOKE	20.00	24 years 5 months (1984.03.13.)	Research	
Japan	DCA	1.00	Shutdown (1969.12.28.~?)	Education (critical assembly)	
Japan	FCA	2.00	41 years 3 months (1967.04.29.)	Education (critical assembly)	

Japan	HTR	100.00	Shutdown (1961.12.25.~1975.02.17.)	assembly) Research	
Japan	HTTR	30,000.00	9 years 10 months (1998.10.11.)	Test	
Japan	JMTR	50,000.00	40 years 4 months (1968.03.30.)	Test	
Japan	JMTRC	0.10	Shutdown (1965.10.01.~1995.12.27.)	Education (critical assembly)	Decommissioned
Japan	JOYO	140,000.00	Shutdown (1977.04.24.~?)	Research	
Japan	JRR-2	10,000.00	Shutdown (1960.10.01.~1996.12.19.)	Research	Decommissioned
Japan	JRR-3	10,000.00	Shutdown (1962.01.01.~1983.01.01.)	Research	
Japan	JRR-3M	20,000.00	18 years 4 months (1990.03.22.)	Research	
Japan	JRR-4	3,500.00	43 years 6 months (1965.01.28.)	Research	
Japan	KUCA	0.10	34 years (1974.08.06.)	Education (critical assembly)	
Japan	KUR	5,000.00	Temporary Shutdown (1964.06.25.~)		
Japan	MUSASHI REACTOR	100.00	Shutdown (1963.01.30.~1989.12.01.)	Research	
Japan	NSRR	300.00	33 years 1 month (1975.06.30.)	Research	
Japan	STACY	0.20	13 years 5 months (1995.02.23.)	Education (critical assembly)	
Japan	TCA TANK TYPE CRIT. ASSBLY	0.20	45 years 11 months (1962.08.23.)	Education (critical assembly)	
Japan	TOSIBA NCA	0.20	44 years 8 months (1963.12.11.)	Education (critical assembly)	
Japan	TRACY	10.00	12 years 8 months (1995.12.20.)	Education (critical assembly)	
Japan	TRIGA-II RIKKYO	100.00	Shutdown (1961.12.08.~?)	Research	
Japan	TTR	100.00	Shutdown (1962.03.13.~2001.10.02.)	Research	
Japan	UTR KINKI	0.00	46 years 9 months (1961.11.11.)	Research	
Japan	VHTRC	0.01	Shutdown (1985.05.13.~?)	Education (critical assembly)	Decommissioned
Japan	YAYOI	2.00	37 years 4 months (1971.04.10.)	Research	
Kazakhstan	EWG 1	60,000.00	36 years 7 months (1972.01.01.)	Research	

Kazakhstan	IGR	10,000.00	47 years 7 months (1961.01.01.)	Research	
Kazakhstan	WWR-K ALMA ATA	6,000.00	40 years 9 months (1967.10.22.)	Research	
Korea, Republic of	AGN 201 SUWON	0.00	25 years 8 months (1982.12.03.)	Education (training)	
Korea, Republic of	HANARO	30,000.00	13 years 6 months (1995.02.08.)	Test	
Korea, Republic of	TRIGA MK II - SEOUL	250.00	Shutdown (1962.03.19.~1995.12.31.)	Education (training)	
Korea, Republic of	TRIGA MK III - SEOUL	2,000.00	Shutdown (1972.04.10.~1995.12.31.)	Research	
Latvia	IRT	5,000.00	Shutdown (1961.09.26.~1998.06.19.)	Research	
Latvia	RKS25	0.03	Shutdown (1966.09.15.~1993.02.01.)	Education (critical assembly)	
Libya	IRT-1	10,000.00	26 years 11 months (1981.08.28.)	Research	
Malaysia	TRIGA PUSPATI (RTP)	1,000.00	26 years 1 month (1982.06.28.)	Research	
Mexico	CHICAGO MODELO 9000	0.00	39 years 3 months (1969.05.14.)	Education (training)	
Mexico	NUCLEAR CHICAGO MOD 2000	0.00	39 years 7 months (1969.01.01.)	Education (training)	
Mexico	SUR-100 (UNAM)	0.00	Shutdown (1972.09.22.~1989.05.26.)	Education (training)	Decommissioned
Mexico	TRIGA MARK III	1,000.00	39 years 9 months (1968.11.08.)	Research	
Morocco	MA-R1	2,000.00	Under construction	-	
Netherlands	BARN	100.00	Shutdown (1963.04.01.~1980.01.01.)	Research	Decommissioned
Netherlands	HFR	45,000.00	46 years 9 months (1961.11.09.)	Test	
Netherlands	HOR	2,000.00	45 years 3 months (1963.04.25.)	Research	
Netherlands	KSTR	1,000.00	Shutdown (1974.05.22.~1977.05.18.)	Research	Decommissioned
Netherlands	LFR	30.00	47 years 10 months (1960.09.28.)	Research	
Nigeria	NIRR-0001	30.00	4 years 6 months (2004.02.03.)	Research	
Norway	HBWR	20,000.00	49 years 1 month (1959.06.29.)	Research	
Norway	JEEP II	2,000.00	41 years 8 months (1966.12.01.)	Research	
Pakistan	PARR-1	10,000.00	42 years 7 months (1965.12.21.)	Research	
Pakistan	PARR-2	30.00	18 years 9 months (1989.11.02.)	Research	
Peru	RP-0	0.00	30 years (1978.07.20.)	Education (training)	
Peru	RP-10	10,000.00	19 years 8 months (1988.11.30.)	Research	

Philippines	PRR-1	3,000.00	Shutdown (1963.08.26.~1988.01.01.)	Research	
Poland	AGATA	0.10	Shutdown (1973.05.05.~1995.01.01.)	Education (critical assembly)	Decommissioned
Poland	ANNA	0.10	Shutdown (1963.01.01.~1977.11.29.)	Education (critical assembly)	
Poland	EWA	10,000.00	Shutdown (1958.06.14.~1995.02.24.)	Test	
Poland	MARIA	30,000.00	33 years 8 months (1974.12.18.)	Test	
Poland	MARYLA	100.00	Shutdown (1967.02.01.~1973.01.01.)	Research	
Portugal	RPI	1,000.00	47 years 3 months (1961.04.25.)	Research	
Romania	RP-01	0.00	Shutdown (1976.02.01.~1977.01.01.)	Education (critical assembly)	Decommissioned
Romania	TRIGA II PITESTI - PULSED	500.00	28 years 9 months (1979.11.17.)	Test	
Romania	TRIGA II PITESTI - SS CORE	14,000.00	28 years 9 months (1979.11.17.)	Test	
Romania	VVR-S BUCHAREST	2,000.00	Shutdown (1957.07.01.~1997.12.01.)	Research	
Russia	1120	0.00	Shutdown (1975.01.01.~1996.01.01.)	Education (critical assembly)	Decommissioned
Russia	1125	0.60	33 years 7 months (1974.01.01.)	Education (critical assembly)	
Russia	27/BM	70,000.00	Shutdown (1956.01.01.~?)	Test	
Russia	27/BT	70,000.00	Shutdown (1961.01.01.~?)	Test	
Russia	659	0.10	45 years 7 months (1963.01.01.)	Education (critical assembly)	
Russia	659-L	0.00	Shutdown (?~?)	Education (critical assembly)	
Russia	AM-1	10,000.00	Shutdown (1954.06.15.~?)	Research	
Russia	AMBF-2	0.10	24 years 7 months (1984.01.01.)	Education (critical assembly)	
Russia	ARBUS (ACT-1)	12,000.00	Shutdown (1963.01.01.~1988.05.01.)	Test	
Russia	ARGUS	20.00	26 years 8 months (1981.12.01.)	Research	
Russia	ARGUS-2	50.00	-	Research	
Russia	ASTRA	0.10	27 years 7 months (1981.01.01.)	Education (critical assembly)	

Russia	B-1000	0.20	Shutdown (1986.01.01.~1998.01.27.)	Education (critical assembly)	
Russia	B-6	0.10	12 years 7 months (1996.01.01.)	Test	
Russia	BARS-2	0.00	Shutdown (1971.01.01.~?)	Test	
Russia	BARS-3M	0.00	Shutdown (1988.01.01.~1996.01.01.)	Test	Decommissioned
Russia	BARS-4	0.00	Shutdown (1979.01.01.~?)	Test	
Russia	BARS-5 (FNRS)	10.00	Shutdown (1986.01.01.~?)	Research	Decommissioned
Russia	BFS-1	0.20	47 years 7 months (1961.01.01.)	Education (critical assembly)	
Russia	BFS-2	1.00	39 years 7 months (1969.01.01.)	Education (critical assembly)	
Russia	BOR-60	60,000.00	38 years 8 months (1969.12.01.)	Research	
Russia	BR-1	0.05	43 years 7 months (1965.01.01.)	Education (critical assembly)	
Russia	BR-10	8,000.00	Shutdown (1958.06.01.~?)	Research	
Russia	CA MIR.M1	0.01	42 years 7 months (1966.01.01.)	Education (critical assembly)	
Russia	CA-SM	0.02	38 years 7 months (1970.01.01.)	Education (critical assembly)	
Russia	COBR	0.30	Shutdown (1970.01.01.~?)	Education (critical assembly)	
Russia	DELTA	0.10	23 years 7 months (1985.01.01.)	Education (critical assembly)	
Russia	EMPHIR-2M	0.10	35 years 7 months (1973.01.01.)	Education (critical assembly)	
Russia	F-1	24.00	61 years 7 months (1946.12.25.)	Research	
Russia	FBR-L, FAST BURST-LASER	5.00	27 years (1981.07.31.)	Research	
Russia	FG-5	0.10	Shutdown (1967.01.01.~?)	Education (critical assembly)	
Russia	FM MR	0.10	Shutdown (1971.01.01.~?)	Education (critical assembly)	
Russia	FS-1M	0.00	38 years 7 months (1970.01.01.)	Education (critical assembly)	

Russia	G-1	0.20	Shutdown (1964.01.01~?)	assembly) Education (critical	
Russia	GAMMA	125.00	Shutdown (1982.01.01.~?)	assembly) Test	
Russia	GIDRA (HIDRA)	10.00	36 years 7 months (1972.01.01.)	Research	
Russia	GROG	0.10	28 years 7 months (1980.01.01.)	Education (critical	
Russia	IBR-2	1,500.00	30 years 8 months(1977.11.30.)	assembly) Research	
Russia	IBR-30	25.00	Shutdown (1969.01.01.~?)	Research	
Russia	IFR (IBR-1)	6.00	Shudown (1960.12.01.~1969.01.01.)	Education (critical	Decommissioned
Russia	IGRIK, PULSED HOMOG	30.00	32 years 8 months (1975.12.15.)	assembly) Research	
Russia	IIN-3M	0.00	Shutdown (1972.01.01.~1982.01.01.)	Test	Decommissioned
Russia	IR-50	50.00	Shutdown (1961.02.20.~1993.01.01.)	Research	
Russia	IR-8	8,000.00	27 years (1981.08.01.)	Research	
Russia	IRT	2,500.00	41 years 2 months (1967.05.26.)	Research	
Russia	IRT-T	6,000.00	41 years (1967.07.22.)	Research	
Russia	IRV-1M	2,000.00	Shutdown (1974.01.01.~1993.01.01.)	Research	
Russia	IVV-2M	15,000.00	42 years 3 months (1966.04.23.)	Research	
Russia	KVANT	1.00	18 years 7 months (1990.01.01.)	Education (critical	
Russia	MAKET	0.10	Shutdown (1976.01.01.~?)	assembly) Education (critical	
Russia	MATR-2	0.40	45 years 7 months (1963.01.01.)	assembly) Education (critical	
Russia	MAYAK	0.01	Shutdown (1967.01.01.)	assembly) Education (critical	
Russia	MER	0.20	Shutdown (1970.01.01.~?)	assembly) Education (critical	
Russia	MIR.M1	100,000.00	41 years 8 months (1966.12.01.)	Research	
Russia	MR	50,000.00	Shutdown (1963.12.01.~1992.01.01.)	Test	
Russia	NARTSISS-M	0.01	25 years 7 months (1983.01.01.)	Education (critical	

Russia	OP	300.00	18 years 8 months (1989.12.01.)	assembly)	
Russia	P	0.20	21 years 7 months (1987.01.01.)	Research	
Russia	PIK	100,000.00	Under construction	Education (critical	
Russia	PIK PHYSICAL MODEL	0.10	24 years 7 months (1983.12.24.)	assembly)	
Russia	RBMK	0.03	27 years 7 months (1981.01.01.)	Education (critical	
Russia	RBT-6	6,000.00	33 years 7 months (1975.01.10.)	assembly)	
Russia	RBT-10/1	10,000.00	Shutdown (1983.12.01.~1994.03.01.)	Research	
Russia	RBT-10/2	7,000.00	23 years 8 months (1984.12.01.)	Research	
Russia	RF-GS	0.01	46 years 7 months (1962.01.01.)	Education (critical	
Russia	RG-1M	100.00	Shutdown (1970.04.15.~1998.06.10.)	assembly)	
Russia	ROMASHKA	40.00	Shutdown (1964.08.01.~1966.01.01.)	Research	Decommissioned
Russia	RPT	10,000.00	Shutdown (1952.04.01.~1962.01.01.)	Research	Decommissioned
Russia	S111	0.00	-	Test	Decommissioned
Russia	SBR-2	150.00	Shutdown (1957.03.01.~1957.04.01.)	Education (critical	Decommissioned
Russia	SF-1	0.10	36 years 7 months (1972.01.01.)	assembly)	
Russia	SF-3	0.10	Shutdown (1979.01.01.~1993.01.01.)	Research	
Russia	SF-5	0.10	Shutdown (1972.01.01.~1993.01.01.)	Education (critical	
Russia	SF-7	0.10	33 years 7 months (1975.01.01.)	assembly)	
Russia	SGO	0.10	Shutdown (1969.01.01.~1994.01.12.)	Education (critical	
Russia	SK PHYSICAL	0.60	11 years 7 months (1997.01.01.)	assembly)	

Russia	SM	100,000.00	47 years 7 months (1961.01.01.)	Research	
Russia	STEND-1	2.00	Shutdown (1966.01.01.~1998.01.01.)	Education (critical assembly)	
Russia	STEND-2	2.00	39 years 7 months (1969.01.01.)	Education (critical assembly)	
Russia	STEND-3	2.00	41 years 7 months (1967.01.01.)	Education (critical assembly)	
Russia	STEND-4	0.50	41 years 7 months (1967.01.01.)	Education (critical assembly)	
Russia	STEND-5	0.50	41 years 7 months (1967.01.01.)	Education (critical assembly)	
Russia	STEND-6	0.05	Shutdown (1968.01.01.~1998.01.01.)	Education (critical assembly)	
Russia	STEND-7	0.70	Shutdown (1979.01.01.~1994.01.01.)	Education (critical assembly)	
Russia	STRELA	0.02	40 years 7 months (1968.01.01.)	Education (critical assembly)	
Russia	T-2	0.00	Shutdown (1965.01.01.~?)	Education (critical assembly)	
Russia	TIBR-1M	0.00	Shutdown (1976.01.01.~?)	Test	
Russia	TOPAZ	150.00	Shutdown (1966.01.01.~?)	Test	Decommissioned
Russia	TVR	2,500.00	Shutdown (1949.01.01.~1986.01.01.)	Research	
Russia	U-3	50.00	Shutdown (1964.01.01.~1992.09.18.)	Research	
Russia	UG	0.10	Shutdown (1965.01.01.~?)	Education (critical assembly)	
Russia	VK-50	200,000.00	43 years 1 month (1965.07.01.)	Prototype reactor	
Russia	VRL-02	100.00	Shutdown (1959.01.01.~1974.01.01.)	Research	
Russia	VRL-03	100.00	Shutdown (1961.01.01.~1969.01.01.)	Research	
Russia	WWR-M	18,000.00	48 years 7 months (1959.12.29.)	Research	
Russia	WWR-TS	15,000.00	43 years 10 months (1964.10.04.)	Research	
Russia	YAGUAR (NHUAR)	10.00	18 years 1 month (1990.06.29.)	Research	
Slovenia	TRIGA- MARK II LJUBLJANA	250.00	42 years 2 months (1966.05.31.)	Research	

South Africa	SAFARI-1	20,000.00	43 years 5 months (1965.03.18.)	Research	
Spain	ARBI REACTOR	10.00	Shutdown (1962.06.26.~1975.02.01.)	Education (training)	Decommissioned
Spain	ARGOS RESEARCH REACTOR	1.00	Shutdown (1961.06.01.~1975.09.01.)	Education (training)	Decommissioned
Spain	CORAL- I	0.05	Shutdown (1968.03.28.~1988.06.01.)	Research	Decommissioned
Spain	JEN-1 MOD	3,000.00	Shutdown (1958.10.09.~1987.02.18.)	Research	
Sweden	KRITZ	0.10	Shutdown (1969.10.01.~1976.01.01.)	Education (critical assembly)	Decommissioned
Sweden	R-1	600.00	Shutdown (1954.07.13.~?)	Test	
Sweden	R-2	50,000.00	Shutdown (1960.05.04.~?)	Test	
Sweden	R2-0	1,000.00	Shutdown (1960.06.20.~?)	Research	
Switzerland	AGN 201 P	0.00	Shutdown (1958.06.01.~1987.01.01.)	Education (training)	Decommissioned
Switzerland	AGN 211 P	2.00	49 years (1959.08.01.)	Education (training)	
Switzerland	CROCUS	0.10	25 years 1 month (1983.07.13.)	Education (critical assembly)	
Switzerland	DIORIT	30,000.00	Shutdown (1960.10.10.~1977.07.07.)	Research	
Switzerland	PROTEUS	1.00	40 years 7 months (1968.01.01.)	Education (critical assembly)	
Switzerland	SAPHIR	10,000.00	Shutdown (1957.04.30.~1994.05.13.)	Research	
Syria	SRR-1	30.00	12 years 5 months (1996.03.04.)	Research	
Chinese Taipei	THAR	10.00	Shutdown (1974.04.20.~1991.05.24.)	Research	Decommissioned
Chinese Taipei	THMER	0.00	Shutdown (1975.11.19.~1996.01.01.)	Education (training)	
Chinese Taipei	THOR	2,000.00	47 years 4 months (1961.04.13.)	Research	
Chinese Taipei	TRR	40,000.00	Shutdown (1973.01.03.~1988.01.01.)	Test	
Chinese Taipei	TRR- II	20,000.00	Under construction (2006.07.01.)*	-	* Criticality date
Chinese Taipei	WBRL	100.00	Shutdown (1983.02.23.~1989.02.01.)	Research	Decommissioned
Chinese Taipei	ZPRL	30.00	Shutdown (1971.02.02.~?)	Research	

Taipei					
Thailand	TRR-1/M1	2,000.00	30 years 9 months (1977.11.07.)	Research	
Thailand	TRR-2	5,000.00	Under construction	-	
Tunisia	TRR	2,000.00	Planned	-	
Turkey	ITU-TRR, TECH UNIV	250.00	29 years 5 months (1979.03.11.)	Research	
Turkey	TR-1, TURKISH REACTOR 1	1,000.00	Shutdown (1962.01.01.~1977.09.17.)	Research	
Turkey	TR-2, TURKISH REACTOR 2	5,000.00	Shutdown (1981.12.10.~1995.07.22.)	Research	
Ukraine	SNI, IR-100	200.00	Shutdown (1967.04.18.~1995.01.04.)	Education (training)	
Ukraine	SPh IR-100	0.00	Shutdown (1974.07.17.~1995.01.04.)	Education (training)	
Ukraine	WWR-M KIEV	10,000.00	48 years 8 months (1960.12.02.)	Research	
UK	BEPO	6,500.00	Shutdown (1962.01.01.~1968.12.01.)	Research	Decommissioned
UK	BERKELEY ZERO ENERGY	1.00	Shutdown (1966.04.14.~1988.01.01.)	Research	Decommissioned
UK	DAPHNE	0.10	Shutdown (1962.01.01.~1967.12.01.)	Research	Decommissioned
UK	DIDO	26,000.00	Shutdown (1956.11.07.~1990.03.31.)	Test	Decommissioned
UK	DIMPLE	0.10	Shutdown (1962.01.01.~1995.06.30.)	Research	Decommissioned
UK	DOUNREAY FAST REACTOR	65,000.00	Shutdown (1959.11.01.~1977.03.01.)	Electricity producing	
UK	DOUNREAY MTR	22,500.00	Shutdown (1958.05.01.~1969.05.01.)	Test	Decommissioned
UK	DRAGON	20,000.00	Shutdown (1964.01.01.~1976.01.01.)	Test	Decommissioned
UK	GLEEP	50.00	Shutdown (1947.08.18.~1990.09.03.)	Research	
UK	HAZEL	0.00	Shutdown (1957.01.01.~1958.01.01.)	Education (critical assembly)	Decommissioned
UK	HECTOR (Type of zero power HTD)	0.10	Shutdown (1963.03.01.~1977.01.01.)	Research	Decommissioned
UK	HECTOR (Type of graphite CO ₂)	0.10	Shutdown (1963.03.10.~1976.01.01.)	Research	Decommissioned
UK	HERALD	5,000.00	Shutdown (1960.10.10.~1988.09.01.)	Research	
UK	HERO	3.00	Shutdown (1962.06.01.~1968.06.01.)	Education (critical assembly)	Decommissioned
UK	HORACE	0.01	Shutdown (1958.05.01.~1976.01.01.)	Education (critical assembly)	Decommissioned
UK	ICI TRIGA REACTOR	250.00	Shutdown (1971.08.01.~1996.06.28.)	Research	Decommissioned
UK	IMPERIAL COLLEGE	100.00	Shutdown (1965.09.04.~2008.03.31.)	Research	
UK	JASON	10.00	Shutdown (1959.09.30.~1996.10.01.)	Education (training)	Decommissioned
UK	JUNO	0.10	Shutdown (1964.03.01.~1973.12.01.)	Education (critical)	Decommissioned

UK	LIDO	300.00	Shutdown (1956.09.01.~1974.09.01.)	assembly)	Decommissioned
UK	MERLIN	5,000.00	Shutdown (1959.07.01.~1976.01.01.)	Research	Decommissioned
UK	NEPTUNE	0.10	45 years 7 months (1963.01.03.)	Education (critical assembly)	
UK	NESTOR	30.00	Shutdown (1961.01.01.~1995.06.30.)	Research	Decommissioned
UK	PLUTO	26,000.00	Shutdown (1957.10.25.~1990.03.31.)	Test	
UK	QMC UTR-B	100.00	Shutdown (1964.08.10.~1982.01.01.)	Education (training)	Decommissioned
UK	THE UNIV RESEARCH REACTOR	300.00	Shutdown (1964.07.07.~1991.07.31.)	Education (training)	Decommissioned
UK	UTR-300	300.00	Shutdown (1963.06.01.~1995.09.30.)	Education (training)	Decommissioned
UK	VERA NUCLEAR ASSEMBLY	0.10	Shutdown (1961.01.01.~1971.12.01.)	Research	Decommissioned
UK	VIPER	0.50	41 years 2 months (1967.05.26.)	Test	
UK	VULCAN	0.00	Shutdown (1961.01.01.~1997.12.01.)	Prototype reactor	
UK	WINDSCALE AGR	120,000.00	Shutdown (1962.08.09.~1981.04.03.)	Prototype reactor	Decommissioned
UK	ZEBRA	1.00	Shutdown (1962.12.01.~1982.09.01.)	Research	
UK	ZENITH I	0.50	Shutdown (1959.12.01.~1972.06.01.)	Research	Decommissioned
UK	ZENITH II	1.00	Shutdown (1972.03.01.~1975.01.01.)	Research	Decommissioned
UK	ZEPHYR	0.00	Shutdown (1954.01.01.~1963.06.01.)	Education (critical assembly)	Decommissioned
UK	ZEUS	0.10	Shutdown (1955.01.01.~1957.09.01.)	Education (critical assembly)	Decommissioned
USA	8GR, OAK RIDGE GRAPHITE	3,500.00	Shutdown (1943.01.01.~1963.11.04.)	Research	Decommissioned
USA	ACPR ANNULAR CORE	600.00	Shutdown (1967.06.06.~1977.01.01.)	Test	
USA	AF NETF	10,000.00	Shutdown (1959.01.01.~1971.01.01.)	Test	
USA	AFRRI TRIGA	1,000.00	46 years 7 months (1962.01.01.)	Research	
USA	AFSR	1.00	Shutdown (1959.01.01.~?)	Research	
USA	AGN-201 ARGONNE	0.00	Shutdown (1959.01.01.~1972.01.01.)	Education (training)	
USA	AGN-201 CAL POLY ST U	0.00	Shutdown (1973.01.01.~1978.07.01.)	Education (training)	Decommissioned
USA	AGN-201 CATHOLIC UNIV	0.00	Shutdown (1957.11.20.~1983.03.01.)	Education (training)	Decommissioned
USA	AGN-201 COLORADO ST UNIV	0.00	Shutdown (1957.01.01.~1974.01.01.)	Education (training)	
USA	AGN-201 GEORGIA TECH	0.00	Shutdown (1968.01.01.~1985.01.01.)	Research	Decommissioned
USA	AGN-201 IDAHO ST. UNIV.	0.01	41 years 7 months (1967.01.01.)	Education (training)	

USA	AGN-201 MEMPHIS ST UNIV	0.00	Shutdown (1977.01.01.~1985.01.01.)	Education (training)	Decommissioned
USA	AGN-201 NEW YORK UNIV	0.00	Shutdown (1968.06.20.~1973.01.01.)	Education (training)	
USA	AGN-201 OKLAHOMA ST	0.00	Shutdown (1957.08.01.~1974.03.19.)	Education (training)	Decommissioned
USA	AGN-201 OREGON STATE	0.00	Shutdown (1959.01.28.~1974.12.01.)	Education (training)	Decommissioned
USA	AGN-201 POLY INST NY	0.00	Shutdown (1967.01.01.~1974.01.01.)	Education (training)	Decommissioned
USA	AGN-201 TEXAS A&M UNIV.	0.01	51 years 7 months (1957.01.01.)	Education (training)	
USA	AGN-201 TUSKEGEE INST	0.00	Shutdown (1974.01.01.~1982.06.01.)	Education (training)	Decommissioned
USA	AGN-201 UNIV DELAWARE	0.00	Shutdown (1958.07.01.~1977.01.01.)	Education (training)	Decommissioned
USA	AGN-201 UNIV UTAH	0.01	Shutdown (1957.09.01.~1988.01.01.)	Education (training)	Decommissioned
USA	AGN-201 UNIV. NEW MEXICO	0.01	42 years 7 months (1966.01.01.)	Education (training)	
USA	AGN-211 RICE UNIV	0.01	Shutdown (1959.01.01.~1967.01.01.)	Education (training)	Decommissioned
USA	AGN-211 UNIV OKLAHOMA	0.10	Shutdown (1959.02.23.~1989.01.01.)	Education (training)	Decommissioned
USA	AGN-211 WEST VIRGINIA	0.08	Shutdown (1959.01.01.~1972.01.01.)	Education (training)	Decommissioned
USA	ALRR AMES	5,000.00	Shutdown (1964.01.01.~1977.01.01.)	Research	Decommissioned
USA	AMRR	5,000.00	Shutdown (1960.10.10.~1970.10.10.)	Research	Decommissioned
USA	ANN. CORE RES. REACTOR (ACRR)	4,000.00	41 years 2 months (1967.06.01.)	Research	
USA	APFA-III ACCEL PULSE	1.00	Shutdown (1967.01.01.~1973.01.01.)	Education (critical assembly)	Decommissioned
USA	APFRF	10.00	Shutdown (1968.01.01.~?)	Research	
USA	ARGONAUT (CP-11)	10.00	Shutdown (1957.02.01.~1972.01.01.)	Education (training)	
USA	ARMF	100.00	Shutdown (1960.10.10.~1991.01.01.)	Education (critical assembly)	
USA	ARR (L-54)	75.00	Shutdown (1956.06.01.~1967.01.01.)	Research	Decommissioned
USA	ARRR	250.00	43 years 1 month (1965.07.09.)	Research	
USA	ASTR, AEROSPACE SYSTEMS	10,000.00	Shutdown (1954.01.01.~1971.01.01.)	Test	
USA	ATR	250,000.00	41 years 1 month (1967.07.02.)	Test	
USA	ATRC	5.00	44 years 3 months (1964.05.19.)	Education (critical assembly)	
USA	ATSR	10.00	Shutdown (1957.01.01.~1988.09.26.)	Research	Decommissioned
USA	ATUTR	250.00	Shutdown (1989.01.01.~1995.02.01.)	Research	
USA	BAWTR BABCOCK & WILCOX	6,000.00	Shutdown (1964.01.01.~1971.12.24.)	Test	Decommissioned
USA	BGRR	20,000.00	Shutdown (1950.08.01.~1969.01.01.)	Test	

USA	BIG TEN	5.00	Shutdown (1972.01.01.~?)	Education (critical assembly)	
USA	BMRC SUNY AT BUFFALO	2,000.00	Shutdown (1964.06.22.~1994.07.01.)	Research	
USA	BMRR	3,000.00	Shutdown (1959.03.15.~?)	Research	
USA	BORAX-1	1,400.00	Shutdown (1953.07.01.~1954.01.01.)	Research	Decommissioned
USA	BORAX-2;-3;-4	5,500.00	Shutdown (1954.10.01.~1958.01.01.)	Electricity producing	Decommissioned
USA	BORAX-5	20,000.00	Shutdown (1962.01.01.~1964.01.01.)	Test	Decommissioned
USA	BRR	2,000.00	Shutdown (1956.01.01.~1975.01.01.)	Research	Decommissioned
USA	BRR UC BERKELEY	1,000.00	Shutdown (1966.08.01.~1987.02.01.)	Research	Decommissioned
USA	BRTR UNIV KANSAS	250.00	Shutdown (1961.06.23.~1986.06.01.)	Education (training)	Decommissioned
USA	BSR BULK SHIELDING REACTO	2,000.00	Shutdown (1950.12.17.~1991.09.10.)	Research	
USA	BYU BRIGHAM YOUNG UNIV	0.00	Shutdown (1967.09.01.~1982.05.11.)	Education (training)	Decommissioned
USA	CAVALIER UNIV VIRGINIA	0.10	Shutdown (1974.01.01.~1987.01.01.)	Education (training)	
USA	CFRMF	100.00	Shutdown (1962.12.04.~1991.01.01.)	Research	
USA	CINTICHEM NUCL REACTOR	5,000.00	Shutdown (1961.09.08.~1990.10.10.)	Research	Decommissioned
USA	CLEMENTINE, LOS ALAMOS	25.00	Shutdown (1947.11.01.~1953.01.01.)	Test	
USA	COMET	0.00	Shutdown (1952.01.01.~?)	Education (critical assembly)	
USA	CP-1, CHICAGO PILE 1	0.20	Shutdown (1942.12.02.~?)	Education (critical assembly)	Decommissioned
USA	CP-2, CHICAGO PILE 2	2.00	Shutdown (1943.01.01.~1954.01.01.)	Research	
USA	CP-3, CHICAGO PILE 3	300.00	Shutdown (1944.05.01.~1963.01.01.)	Research	
USA	CP-5, ARGONNE RESEARCH	5,000.00	Shutdown (1954.02.01.~1979.03.30.)	Research	Decommissioned
USA	CURTISS-WRIGHT R R	3,000.00	Shutdown (1958.04.29.~1959.01.01.)	Research	Decommissioned
USA	CX-10 BABCOCK & WILCOX	1.00	Shutdown (1958.01.01.~1983.09.16.)	Education (critical assembly)	Decommissioned
USA	DEMO REACTOR	10.00	Shutdown (1969.01.01.~1969.01.01.)	Education (training)	Decommissioned
USA	DORF TRIGA MARK F	250.00	Shutdown (1961.01.01.~1970.10.10.)	Research	
USA	DOW TRIGA	300.00	41 years 1 month (1967.07.06.)	Research	
USA	EAEP	10.00	Shutdown (1963.01.01.~1969.01.01.)	Education (training)	Decommissioned
USA	EBR-1	1,200.00	Shutdown (1951.12.01.~1964.01.01.)	Prototype reactor	Decommissioned
USA	EBR-II	62,500.00	Shutdown (1961.09.30~1994.09.30.)	Research	Decommissioned

USA	EBWR	4,000.00	Shutdown (1957.02.01.~1967.07.01.)	Prototype reactor	Decommissioned
USA	ETR	175,000.00	Shutdown (1957.09.02.~1981.01.01.)	Test	
USA	ETRC	50.00	Shutdown (1957.01.01.~1981.01.01.)	Education (critical assembly)	Decommissioned
USA	FAST BURST (FBR)	10,000.00	44 years 7 months (1964.01.01.)	Research	
USA	FAST BURST (SKUA)	1.00	Shutdown (1978.01.01.~?)	Education (critical assembly)	Decommissioned
USA	FFTF FAST FLUX TEST	400,000.00	Shutdown (1980.02.09.~1992.03.18.)	Test	
USA	FLATTOP	0.10	Shutdown (1957.01.01.~?)	Education (critical assembly)	Decommissioned
USA	FNR	2,000.00	Shutdown (1957.09.18.~?)	Research	
USA	FRAN	0.00	Shutdown (1962.01.01.~1970.10.10.)	Research	Decommissioned
USA	FS-1,FAST SOURCE REACTOR	1.00	Shutdown (1967.01.01.~1970.10.10.)	Education (critical assembly)	
USA	GA-TRIGA F	250.00	Shutdown (1960.07.01.~1995.04.01.)	Research	Decommissioned
USA	GA-TRIGA I	250.00	Shutdown (1958.05.03.~1997.10.29.)	Research	
USA	GA-TRIGA III	1,500.00	Shutdown (1966.01.01.~1975.01.01.)	Research	Decommissioned
USA	GCR, GAS CAVITY REACTOR	2,200.00	Shutdown (1960.10.10.~1962.01.01.)	Prototype reactor	
USA	GENERAL ELECTRIC TEST REA	50,000.00	Shutdown (1958.12.01.~1977.10.26.)	Test	Decommissioned
USA	GODIVA	1.00	Shutdown (1967.01.01.~?)	Education (critical assembly)	
USA	GSTR GEOLOGICAL SURVEY	1,000.00	39 years 5 months (1969.02.26.)	Research	Decommissioned
USA	GTRR	5,000.00	Shutdown (1964.12.31.~1997.07.01.)	Research	
USA	HFBR	60,000.00	Shutdown (1965.10.31.~1996.12.01.)	Research	Decommissioned
USA	HFIR	85,000.00	43 years (1965.08.01.)	Research	
USA	HONEYCOMB	0.00	Shutdown (1956.01.01.~?)	Education (critical assembly)	Decommissioned
USA	HOTCE	0.00	Shutdown (1956.01.01.~1961.01.01.)	Education (critical assembly)	
USA	HPRR	10.00	Shutdown (1963.05.31.~1991.02.01.)	Research	Decommissioned
USA	HST ROCKY FLATS	0.00	Shutdown (1965.01.01.~1989.10.01.)	Education (critical assembly)	

USA	HTLTR	2.00	Shutdown (1967.01.01.~1971.01.01.)	Research	
USA	HTR	0.03	Shutdown (1945.02.01~1976.01.01.)	Research	
USA	HTRE 2	14,000.00	Shutdown (1957.01.01.~1961.01.01.)	Prototype reactor	
USA	HTRE-1	20,000.00	Shutdown (1956.01.01.~1957.01.01.)	Prototype reactor	
USA	HTRE-3	32,000.00	Shutdown (1958.01.01.~1961.01.01.)	Prototype reactor	
USA	HWCTR	61,000.00	Shutdown (1962.03.01.~1964.01.01.)	Test	
USA	HYDRO, LOS ALAMOS HYDRO	0.00	Shutdown (1956.01.01.~1970.10.10.)	Test	
USA	HYPO, LOS ALAMOS WATER	6.00	Shutdown (1944.12.01.~1950.10.10.)	Test	
USA	IRL	5,000.00	Shutdown (1958.12.01.~1975.01.01.)	Research	Decommissioned
USA	JANUS	200.00	Shutdown (1964.01.01.~1992.01.01.)	Research	Decommissioned
USA	JEZEBEL,CRITICA- L ASSEMBLY	0.00	Shutdown (1954.01.01.~1987.01.01.)	Education (critical assembly)	
USA	JUGGERNAUT ARGONNE	250.00	Shutdown (1962.01.01.~1970.10.10.)	Research	
USA	KEWB	50.00	Shutdown (1956.07.01.~1967.01.01.)	Test	
USA	KINGLET	0.00	Shutdown (1972.01.01.~1977.01.01.)	Test	
USA	KIWI-TRANSIENT TEST	0.00	Shutdown (1965.01.01.~1965.01.01.)	Test	
USA	KSU TRIGA MK II	250.00	45 years 10 months (1962.10.16.)	Education (training)	
USA	KUKLA	0.00	Shutdown (1959.01.01.~1964.01.01.)	Research	
USA	L 77 ROCKWELL INT	0.01	Shutdown (1960.10.10.~1974.09.30.)	Education (training)	Decommissioned
USA	L-47 ROCKWELL INT	0.00	Shutdown (1957.12.01.~1958.08.01.)	Education (training)	Decommissioned
USA	L-77 UNIV OF NEVADA	0.01	Shutdown (1963.01.01.~1974.01.01.)	Education (training)	Decommissioned
USA	L-77 UNIV OF WYOMING	0.01	Shutdown (1959.02.01.~1974.01.01.)	Education (training)	Decommissioned
USA	L-77 UNIV PUERTO RICO	10.00	Shutdown (1959.08.01.~1979.01.01.)	Education (training)	
USA	L-85 NUCLEAR EXAMINATION	3.00	Shutdown (1952.04.21.~1980.02.29.)	Research	Decommissioned
USA	LITR	3,000.00	Shutdown (1950.02.01.~1968.10.08.)	Research	
USA	LIWB	0.50	Shutdown (1953.01.01.~1961.01.01.)	Research	Decommissioned
USA	LOFT	50,000.00	Shutdown (1978.02.05.~1985.07.09.)	Test	
USA	LPR	1,000.00	Shutdown (1958.09.19.~1981.01.01.)	Research	Decommissioned
USA	LPTR	3,000.00	Shutdown (1957.12.13.~1980.10.10.)	Research	Decommissioned
USA	LTR GROUND TEST REACTOR	10,000.00	Shutdown (1953.01.01.~1963.01.01.)	Test	
USA	LTR LATTICE TEST REACTOR	0.50	Shutdown (1967.01.27.~1979.08.01.)	Research	

USA	MARF	0.00	Shutdown (1976.01.01.~1997.01.01.)	Prototype reactor	
USA	MARS	0.00	Shutdown (1974.01.01.~?)	Education (critical assembly)	
USA	MCZPR, MANHATTAN COLLEGE	0.00	Shutdown (1964.03.24.~1997.01.01.)	Education (training)	
USA	MITR-II MASS. INST. TECH.	5,000.00	50 years (1958.07.21.)	Research	
USA	ML-1	3,300.00	Shutdown (1961.01.01.~1965.01.01.)	Prototype reactor	
USA	MTR	40,000.00	Shutdown (1952.03.01.~1970.10.10.)	Test	
USA	MURR UNIV. OF MISSOURI	10,000.00	41 years 10 months (1966.10.13.)	Research	
USA	MUTR UNIV. MARYLAND	250.00	47 years 8 months (1960.12.01.)	Education (training)	
USA	NBSR	20,000.00	40 years 8 months (1967.12.07.)	Research	
USA	NRAD	250.00	30 years 10 months (1977.10.12.)	Research	
USA	NRF NEUTRON RAD FACILITY	1,000.00	Shutdown (1977.03.01.~1989.01.01.)	Test	
USA	NRR NAVAL RES REACTOR	1,000.00	Shutdown (1956.01.01.~1970.10.10.)	Research	Decommissioned
USA	NSCR TEXAS A&M UNIV.	1,000.00	46 years 7 months (1962.01.01.)	Research	
USA	NTG, NUCLEAR TEST GAGE	0.00	Shutdown (1958.11.01.~1987.01.01.)	Research	
USA	NTR GENERAL ELECTRIC	100.00	50 years 9 months (1957.11.15.)	Research	
USA	OMRE	12,000.00	Shutdown (1957.09.01.~1963.01.01.)	Prototype reactor	
USA	ORR, OAK RIDGE RESEARCH	30,000.00	Shutdown (1958.03.01.~1987.03.26.)	Research	
USA	OSTR, OREGON STATE UNIV.	1,100.00	41 years 5 months (1967.03.08.)	Research	
USA	OSURR OHIO ST. UNIV.	500.00	47 years 5 months (1961.03.16.)	Research	
USA	OWR, OMEGA WEST REACTOR	8,000.00	Shutdown (1956.07.01.~1992.11.01.)	Test	
USA	PARKA,CRITICAL ASSEMBLY	0.00	Shutdown (1963.01.01.~1987.01.01.)	Education (critical assembly)	
USA	PBF POWER BURST FACILITY	28,000.00	Shutdown (1972.09.22.~1992.08.04.)	Test	
USA	PBMUR MOCK UP	100.00	Shutdown (1961.01.01.~1973.01.01.)	Research	
USA	PBR PLUMBROOK REACTOR	60,000.00	Shutdown (1961.01.01.~1973.01.01.)	Test	
USA	PCA	10.00	Shutdown (1958.04.01.~1991.09.10.)	Research	
USA	PCTR	0.10	Shutdown (1955.10.01.~1972.01.01.)	Research	
USA	PDP	0.50	Shutdown (1953.10.01.~1979.08.01.)	Research	
USA	PHRENIC	100.00	Shutdown (1965.01.01.~1970.10.10.)	Research	Decommissioned
USA	PLASMA CORE ASSEMB (PCA)	0.10	Shutdown (1974.01.01.~1987.01.01.)	Education (critical	

USA	PNL-CML	0.00	Shutdown (1961.01.01.~1988.12.31.)	assembly) Education (critical	
USA	PRCF	0.00	Shutdown (1962.01.01.~1979.03.26.)	assembly) Education (critical	Decommissioned
USA	PRR PAWLING RES REACTOR	0.01	Shutdown (1958.11.01.~1971.01.01.)	Research	
USA	PSBR PENN ST. UNIV.	1,000.00	53 years (1955.08.15.)	Research	
USA	PULSTAR N.C. STATE UNIV.	1,000.00	36 years 7 months (1972.01.01.)	Research	
USA	PUR-1 PURDUE UNIV.	1.00	46 years 7 months (1962.01.01.)	Education (training)	
USA	R-63, NORTH CAROLINA ST	10.00	Shutdown (1960.10.10.~1973.01.01.)	Education (training)	Decommissioned
USA	RER LOCKHEED	3,000.00	Shutdown (1958.01.01.~1970.10.10.)	Research	Decommissioned
USA	RINSC RHODE ISLAND NSC	2,000.00	44 years (1964.07.28.)	Research	
USA	RPI RENSSELAER	0.10	44 years 7 months (1964.01.01.)	Education (training)	
USA	RRF REED COLLEGE	250.00	40 years 1 month (1968.07.02.)	Research	
USA	RRR MISS ST UNIV	10.00	Shutdown (1960.10.10~1973.01.01.)	Education (training)	
USA	S1W SUBMARINE PROTOTYPE	0.00	Shutdown (1953.01.01.~1989.10.01.)	Prototype reactor	
USA	S5G SUBMARINE PROTOTYPE	0.00	Shutdown (1965.01.01.~1995.05.01.)	Prototype reactor	
USA	SCHIZO	100.00	Shutdown (1958.01.01.~1970.10.10.)	Research	Decommissioned
USA	SER	5,000.00	Shutdown (1961.01.01.~1970.10.10.)	Test	
USA	SHEBA	2.00	Shutdown (1980.09.04.~?)	Research	
USA	SL-1, STATIONARY LOW POWE	3,000.00	Shutdown (1958.01.01.~1961.01.01.)	Prototype reactor	
USA	SNAPTRAN-1	0.00	Shutdown (1968.01.01.~1971.01.01.)	Test	
USA	SNAPTRAN-2	0.00	Shutdown (1965.01.01.~1966.01.01.)	Test	
USA	SNAPTRAN-3	0.00	Shutdown (1964.01.01.~1964.01.01.)	Test	
USA	SP, STANDARD PILE	10.00	Shutdown (1953.07.25.~1979.01.01.)	Research	
USA	SPERT-1	0.00	Shutdown (1955.01.01.~1964.01.01.)	Test	
USA	SPERT-2	0.00	Shutdown (1960.10.10.~1965.01.01.)	Test	
USA	SPERT-3	60,000.00	Shutdown (1958.01.01.~1968.01.01.)	Test	
USA	SPERT-4	1,000.00	Shutdown (1962.01.01.~1970.10.10.)	Test	
USA	SPR II	5.00	41 years 5 months (1967.03.13.)	Research	
USA	SPR III	10.00	32 years 11 months (1975.08.26.)	Research	
USA	SPR STANFORD UNIV	10.00	Shutdown (1985.12.01.~1973.07.01.)	Education (training)	Decommissioned

USA	SR-305 SAVANNAH RIVER	0.05	Shutdown (1953.01.01.~1981.05.01.)	Education (critical assembly)	Decommissioned
USA	SS, SOLUTION SYSTEM	0.00	Shutdown (1965.01.01.~1989.10.01.)	Education (critical assembly)	
USA	STIR	1,000.00	Shutdown (1961.01.01.~1972.01.01.)	Test	
USA	SUPER KUKLA	0.00	Shutdown (1964.01.01.~1979.01.01.)	Test	
USA	SUPO, LOS ALAMOS WATER	25.00	Shutdown (1951.03.01.~1974.01.01.)	Test	
USA	SUZIE	0.00	Shutdown (1951.01.01.~1957.01.01.)	Test	
USA	TR, TANK RESERVOIR	0.00	Shutdown (1965.01.01~1989.10.01.)	Education (critical assembly)	Decommissioned
USA	TREAT	80.00	Shutdown (1959.02.23.~1994.04.28.)	Research	
USA	TRIGA COLUMBIA UNIV	250.00	Shutdown (1977.01.01.~1985.01.01.)	Research	Decommissioned
USA	TRIGA CORNELL	500.00	Shutdown (1962.01.01.~?)	Research	
USA	TRIGA II UNIV. TEXAS	1,100.00	16 years 5 months (1992.03.12.)	Research	
USA	TRIGA MK F, NORTHRUP	1,000.00	Shutdown (1963.01.01.~1984.01.01.)	Research	Decommissioned
USA	TRIGA MK I MICH ST UNIV	250.00	Shutdown (1969.03.21.~1988.01.01.)	Research	Decommissioned
USA	TRIGA PUERTO RICO NUC CTR	2,000.00	Shutdown (1960.08.01.~1976.01.01.)	Research	
USA	TRIGA UNIV. UTAH	100.00	32 years 9 months (1975.10.25.)	Research	
USA	TRIGA, VET. ADMIN.	20.00	Shutdown (1959.06.26.~?)	Research	
USA	TSR-1	500.00	Shutdown (1954.01.01.~1958.01.01.)	Research	
USA	TSR-II	1,000.00	Shutdown (1960.03.30.~1992.10.01.)	Research	
USA	TTR-2	0.10	Shutdown (1955.01.01.~1972.01.01.)	Research	
USA	UC DAVIS/MCCLELLAN N. RAD. CENTER	2,000.00	18 years 6 months (1990.01.20.)	Research	
USA	UCI, IRVINE	250.00	38 years 8 months (1969.11.25.)	Research	
USA	UCLA R1	100.00	Shutdown (1960.10.01.~1984.01.01.)	Education (training)	Decommissioned
USA	UCSB L-77 SANTA BARBARA	0.01	Shutdown (1975.01.01.~1986.09.01.)	Education (training)	Decommissioned
USA	UFTR UNIV. FLORIDA	100.00	49 years 2 months (1959.05.28.)	Education (training)	
USA	UI-LOPRA UNIV ILLINOIS	10.00	Shutdown (1971.10.10~1995.08.01.)	Education (training)	Decommissioned
USA	UI-TRIGA MK I	100.00	Shutdown (1960.08.01~1968.08.01.)	Education (training)	
USA	UI-TRIGA UNIV. ILLINOIS	1,500.00	Shutdown (1969.07.23.~1998.08.07.)	Research	
USA	UMLR UNIV. MASS. LOWELL	1,000.00	33 years 7 months (1975.01.02.)	Research	

USA	UMRR	200.00	46 years 8 months (1971.12.11.)	Education (training)	
USA	UNIV. ARIZONA TRIGA	100.00	49 years 8 months (1958.12.06.)	Research	
USA	UT TRIGA UNIV TEXAS	1,000.00	Shutdown (1963.01.01.~1988.12.31.)	Research	Decommissioned
USA	UTR-1	0.00	Shutdown (1958.06.01.~1960.10.10.)	Education (training)	
USA	UTR-10 IOWA ST. UNIV.	10.00	Shutdown (1959.10.01~1998.05.15.)	Education (training)	
USA	UVAR UNIV. VIRGINIA	2,000.00	Shutdown (1960.06.01.~1998.07.01.)	Research	
USA	UWNR UNIV WASHINGTON	100.00	Shutdown (1961.04.01.~1988.01.01.)	Education (training)	
USA	UWNR UNIV. WISCONSIN	1,000.00	47 years 4 months (1961.03.26.)	Research	
USA	VPI VIRGINIA POLYTECHNIC	100.00	Shutdown (1959.12.01.~1985.04.16.)	Education (training)	Decommissioned
USA	VST VERTICAL SPLIT TABLE	0.00	Shutdown (1965.01.01.~1989.10.01.)	Education (critical assembly)	
USA	WNTR WESTINGHOUSE	1.00	Shutdown (1972.01.01.~1987.02.01.)	Education (training)	Decommissioned
USA	WPI	10.00	48 years 8 months (1960.12.18.)	Education (training)	
USA	WRRR L-54 WALTER REED	50.00	Shutdown (1962.09.01.~1970.10.10.)	Research	Decommissioned
USA	WSUR WASHINGTON ST. UNIV.	1,000.00	47 years 5 months (1961.03.13.)	Research	
USA	WTR WESTINGHOUSE	60,000.00	Shutdown (1959.01.01.~1963.01.01.)	Test	
USA	ZPPR	1.00	Shutdown (1969.04.18.~1997.01.01.)	Education (critical assembly)	
USA	ZPR	0.10	Shutdown (1962.01.01.~1997.05.01.)	Education (critical assembly)	
USA	ZPR-6, ZERO PWR REACTOR	0.00	Shutdown (1963.01.01.~1981.01.01.)	Education (critical assembly)	
USA	ZPR-9, ZERO PWR REACTOR	0.00	Shutdown (1967.01.01.~1982.01.01.)	Education (critical assembly)	
Uruguay	RU-1	1.00	Shutdown (1978.04.20.~1986.09.15.)	Education (training)	
Uzbekistan	WWR-CM TASHKENT	10,000.00	48 years 11 months (1959.09.10.)	Research	
Venezuela	RV-1, VENEZUELAN REACTOR	3,000.00	Shutdown (1960.07.12.~1994.01.01.)	Research	
Vietnam	DALAT RESEARCH REACTOR	500.00	45 years 5 months (1963.02.26.)	Research	

부록 2 세계 발전로 현황

국가군	발전용 원자로								연구용 원자로		
	가동중		장기 가동정지		건설중		2007년 실적		호기수		
	호기수	용량(MW)	호기수	용량(MW)	호기수	용량(MW)	THh	%	가동중	장기정지	건설중
미주											
Canada	18	12,610	4	2,776	-	-	88.2	14.7	8	8	2
USA	104	100,582	-	-	1	1,165	806.6	19.4	41	117	-
Argentina	2	935	-	-	1	692	6.7	6.2	5	2	-
Brazil	2	1,795	-	-	-	-	11.7	2.8	4	-	-
Mexico	2	1,360	-	-	-	-	9.9	4.6	3	1	-
유럽											
Belgium	7	5,824	-	-	-	-	45.9	54.0	4	2	-
Filand	4	2,696	-	-	1	1,600	22.5	28.9	1	1	-
France	59	63,260	-	-	1	1,600	420.1	76.8	13	18	1
Germany	17	20,430	-	-	-	-	133.2	27.3	12	34	-
Netherland	1	482	-	-	-	-	4.0	4.1	3	2	-
Spain	8	7,450	-	-	-	-	52.7	17.4	-	4	-
Sweden	10	9,034	-	-	-	-	64.3	46.1	-	4	-
Switzerland	5	3,220	-	-	-	-	26.5	40.0	3	3	-
UK	19	10,222	-	-	-	-	57.5	15.1	2	34	-
Armenia	1	376	-	-	-	-	2.3	43.5	-	-	-
Bulgaria	2	1,906	-	-	2	1,906	13.7	32.1	-	1	-
Czech	6	3,619	-	-	-	-	24.6	30.2	3	2	-
Hungary	4	1,829	-	-	-	-	13.9	36.8	2	1	-
Lithuania	1	1,185	-	-	-	-	9.1	64.4	-	2	-
Romania	2	1,305	-	-	-	-	7.1	13.0	2	2	-
Russia	31	21,743	-	-	6	3,639	148.0	16.0	49	47	1

Slovakia	5	2,034	-	-	-	-	14.2	54.3	-	-	-
Slovenia	1	666	-	-	-	-	5.4	41.6	1	-	-
국가군	발전용 원자로								연구용 원자로		
	가동중		장기 가동정지		건설중		2007년 실적		호기수		
	호기수	용량(MW)	호기수	용량(MW)	호기수	용량(MW)	THh	%	가동중	장기정지	건설중
Ukraine	15	13,107	-	-	2	1,900	87.2	48.1	1	2	-
중동/아프리카											
South Africa	2	1,800	-	-	-	-	12.6	5.5	1	-	-
Iran	-	-	-	-	1	915	-	-	5	-	-
아시아/호주											
China	11	8,572	-	-	5	4,220	59.3	1.9	14	2	2
India	17	3,782	-	-	6	2,910	15.8	2.5	5	4	1
Pakistan	2	425	-	-	1	300	2.3	2.3	2	-	-
Japan	55	47,587	1	248	1	866	267.3	27.5	13	10	-
Korea	20	17,451	-	-	3	2,880	136.6	35.3	2	2	-

부록 3. 핵비확산 관련 정책 및 제도

Off-Site Fuels Policy(OSFP)

OSFP는 미국에서 생산되는 연구용 원자로의 핵연료를 회수하는 프로그램이다. 1968년 처음 시도 되었으며 그 목적은 국제 상거래에서 고농축우라늄의 양을 최소화하여 핵무기 제조목적의 전용을 방지하는데 있다. 초창기에는 연구용 원자로의 핵연료를 재처리해왔으며 OSFP에 의해 회수되는 고농축 우라늄의 사용후핵연료에 대해 이권을 부여하는 방식에 의해 운영되어왔으나 1988년 미국의 고농축 우라늄 재처리 금지 정책에 의해 일시 중단되었다. 그 후 클린턴 정부에 RERTR의 협력을 위해 재처리 부분을 제외하는 방식으로 수정하여 다시 시행되었다. 수정된 OSFP에는 해외의 연구용 원자로에서 사용후핵연료 저장시설 부족으로 가동을 정지하거나 사용후핵연료의 재처리 대상국으로 미국 외의 국가를 선택하지 못하도록 고농축 우라늄 뿐 아니라 저농축 우라늄의 사용후핵연료 또한 회수하도록 정하고 있다. 그러나 미국 내 사정 뿐 아니라 각 대상 국가의 고유 문제들로 인해 현재까지는 제대로 시행되지 못하고 있는 실정이다. 미국 내 문제로는 해외에서 들어오는 사용후핵연료에 대한 환경평가와 저장 시설 문제로 인해 저항에 부딪혀 있다. 미국 외의 문제는 주로 유럽에서의 기술적 및 정책적 저항을 들 수 있다. 특히 네덜란드 Petten에 위치한 EU 공동연구센터에서 발생하는 고농축우라늄의 회수를 위해서는 EU의 RERTR 적용과 같은 정치적 강요와 유럽 내 재처리 시설에서 재처리 시 경제성을 갖출 수 있다는 점 등에서 반발을 사고 있다. 그에 반해 영국 경우 미국에서 제조된 고농축 우라늄의 재고를 다른 국가에 되팔지 않는 것에 동의하였으며 러시아의 경우 쌍무협정에 따라 고농축 우라늄을 타국에 팔지 않을 것을 약속하여 이 정책을 지지하였다.

Reduced Enrichment in Research and Test Reactor(RERTR)

OSFP와 더불어 고농축 우라늄의 사용을 줄여 핵비확산성 강화를 이루기 위한 양대 프로그램인 RERTR은 기존의 고농축 우라늄으로부터 저농축 우라늄을 사용하도록 연구용 원자로와 동위원소 생산과정을 개조하기 위해 미국 DOE가 1978년에 착수한 프로그램이다. 이 프로그램의 문제로는 독일의 FRM-2와 같이 저농축 우라늄을 사용하면서 고밀도의 동일한 중성자속을 얻기 위해서는 출력을 증가해야하나 이로 인한 감마선 증가 등으로 열 생성이 증가되어 주위의 극저온에서 가동되는 노심 주변의 실험 장치를 가동하지 못하는 것과 같은 기술적인 요인이 있을 경우 적용이 불가능하다. 그러나 고농축 핵연료를 사용하는 대부분의 연구용 원자로인 46기 연

구용 원자로가 LEU 연료로 이미 변환되었고, 2014년까지 106기의 모든 연구용 원자로를 LEU 연료용으로 전환시킨다는 목표를 갖고 프로그램을 추진하고 있다.

핵무기비확산에 관한 조약(NPT)

1970년 원자력 교역에 관한 최초의 국제적 규약으로 1995년에 무기한 연장되어 매 5년마다 검토회의를 개최한다. NPT는 원자력의 평화적 이용을 위한 국제협력의 틀을 제공해 온 동시에 핵비확산을 위한 전면안전조치 제도의 근거를 제공하고 있다. 우리나라는 1975년에 가입하였다.

쟁거위원회(ZC)

NPT 3조 2항에는 핵비보유국으로 이전되는 핵분열성물질 및 관련 장비 등에 대해 IAEA의 안전조치가 적용되지 않을 경우 이를 제공하지 못하도록 규정하고 있다. 이에 대한 구체적인 시행을 위해 1971년 원자력수출국위원회를 구성하여 논의를 시작한 후 1974년 IAEA 안전조치의 적용을 조건으로 하는 핵분열성물질과 원자력 장비의 통제품목(trigger list)를 작성하여 지침을 발표하였다. 이 쟁거위원회는 비공식적인 위원회로서 통제품목을 정기적으로 개정하나 회원국을 법적으로 구속하지는 않고 있다. 현재 우리나라를 포함한 31개국이 가입되어 있다. 최근 현황으로는 2000년 평가회의에서 통제품목에 플루토늄 동위원소 분리 기술을 포함시키기로 합의하였으며 흑연분말이 핵연료 코팅에 사용될 수 있다는 미국의 주장에 의해 nuclear grade graphite powder를 포함시키는 여부에 대해 협의를 하고 있다.

원자력공급국그룹(NSG)

1974년 인도의 핵실험은 런던클럽으로 불리는 NSG를 설립하게 된 계기가 되었다. NSG의 목적은 프랑스처럼 NPT 회원국이 아닌 국가가 수출통제 체제를 수용하도록 하는 것과 원자력 국제거래에 보다 엄격한 수출 통제를 부과하는 것이었다. 1978년에 INFCIRC/254의 첫 지침을 발표하였으며 1992년에 산업용 및 원자력 이중용도 품목이 포함된 보강 지침을 발표하였다. NSG에서 구축한 제도는 두 개의 부분으로 이루어져있으며 Part1에서는 17항의 수출통제 지침을 담고 있고 Part2에서는 양해각서를 두어 Part1에서 다루지 못한 내용을 7개 항목으로 나누어 취급하고 있다.

최근 NSG에서는 참여국들이 수출거부 실적을 공표하고 관련 정보를 공유함으로써 수입국이 다른 참여국에서 구입하는 것을 방지하고 있는 현행 시스템에서 수출이 이미 이루어진 경우 어떤 평가도 할 수 없을뿐더러 수출통제 체제에 참여하지

않는 국가에서의 2차 확산을 막을 수 없다는 단점으로 인해 수출승인 정보 공유를 강화하는 것에 관심을 가지고 있다. 이를 위해 2002년 총회에서 미국은 비 NSG 국가들의 원자력 활동 추세 분석 및 이해 증진, 수출 거부 통보 및 최종사용자 분석의 효과성 증진, NSG 국가가 공급한 물품의 제 3국 재이전에 대한 이해증진, 환적(transshipment) 문제에 대한 NSG 국가들의 이해 증진을 제안하였으나 다수 참여국들의 행정적 부담과 상업적 비밀 문제로 인해 도입 타당성의 의문을 제기하였다. 이중 일부 참여국들은 현재 시행되고 있는 Part1 품목의 평화적 이용에 대한 수입국 정부의 공식 보증 및 전면안전조치협정 체결이라는 분명한 수출 통제 기준에 대한 이중 재제라는 문제점 제시와 자발적 차원의 거부 통보 및 No-undercut 제도를 시행하는 것이 바람직함을 표명하였다.

또한 9·11테러 이후 핵테러에 대응에 관한 제안을 다루고 있으며 대량살상무기(WMD) 확산을 방지하기 위한 국제적 통제체제를 강화하기 위해 수출통제 품목을 다양화하려는 시도가 진행되고 있다. 이를 위하여 국제 수출통제 품목에 해당되지 않는 일반품목이 대량살상무기의 제조에 활용되는 것을 방지하기 위해 민감국가로 유입되는 것을 차단할 수 있는 제도인 Catch-All 제도를 공식적으로 Part2에 포함하는 것을 2002년에 제안하였다. Catch-All 제도는 대부분의 국가의 지지를 받았으나 일부 국가의 수용 난색 표명으로 인해 2003년 10월에 개최된 CG 회의에서 포괄적인 권고 수준으로 완화하기로 하여 도입하도록 하였다.

최근에는 IAEA의 추가의정서 체결을 공급조건으로 부과하여 수입국의 핵활동 투명성 증진을 촉구하고자 하는 미국의 제안에 대다수의 참여국이 지지하는 양상을 보인 결과 2005년 NPT 평가회의에서 정식으로 채택되었다. 또한 NSG 내의 일부 참여국들은 정보교환회의(IEM: Information Exchange Meeting)에서 이란과 같은 핵개발 의혹국들에 대한 대책 마련을 위해 경계 품목(Watch List)을 배포하기도 하였다.

그러나 NSG의 통제 강화 노력에도 불구하고 현재 세계의 기술수준은 급속이 발전함에 따라 정해진 통제 품목을 가지고는 효과적인 통제를 이행하기 어렵다. 이를 위해서 잦은 개정이 요구되나 현실적으로 통제지침이나 품목의 개정 속도는 기술개발 속도를 따라가지 못하고 있다. 또한 NSG에서 개정된 지침이 적시에 각국 국내법에 적용되어야 그 효과를 최대화 할 수 있으나 각국 여건 상 1년 이상이 소모되는 경우도 있으며 이 경우 통제품목이 유출되는 경우를 방지할 수 없는 상황이 발생할 수도 있는 현실이다. 또한 NSG가 각국의 이점을 반영해야하는 국가 간 협의체이기 때문에 도출과정에 난관이 많이 존재한다. 현재의 수출통제 체제에서 참여국들이 규정한 내용들을 동시에 적용하지 않는 한 통제효과를 일관되게 이행하기

어려우며 각 국의 이해관계에 따라 적용되는 예외조항을 통해 공급되는 장비나 기술에 대한 법적 구속력이 미흡한 편이다. 이로서 NSG의 절차에 의한 수출통제의 효과에 대해 한계가 존재함을 알 수 있다.

IAEA 전면안전조치 협정(Full scope Safeguards Agreement)

1970년 INFCIRC/153으로 공포된 이 협정은 NPT 의무사항의 이행을 검증하는 수단이다. 협정 제 92조에서 안전조치 대상 핵물질의 반출입보고가 의무사항으로 되어 있으며, 이는 핵물질의 이동현황 및 계량관리를 목적으로 하고 있다. Reporting scheme의 보고체계에서 핵물질의 수입과 수출, 특수장비나 비핵물질에 대한 수출에 대한 정보를 포함해야한다. 여기서 특수장비란 INFCIRC/254/Rev.1/Part1의 부록 B에 수록된 전략 물자를 말한다.

