



## 2. 4 次世代炉開発へのメーカーの取組み

### Next Generation Reactor Development Activity at Hitachi, Ltd.

山下 淳一

Junichi Yamashita

日立製作所

Hitachi, Ltd.

#### 2. 4. 1 次世代炉開発戦略

##### (1) 基本的考え方

我が国の原子力開発利用においては原子炉と燃料サイクルの整合性を持ちつつ、原子炉利用範囲をいっそう拡大する革新的原子炉システムの開発が重要である。革新的原子炉システムは信頼性確保を前提に、経済性・安全性に優れ、燃料サイクルを廻る状況変化に柔軟に対処し、発電、水素製造、熱利用など様々な用途に適用できる必要がある。このように、革新的原子炉システムには多様なニーズや多くの開発課題のあることを踏まえ、開発ステップを2段階に分け「次世代炉システム」と「将来炉システム」を並行して開発し段階的に実用化するのが妥当であると考えられる。

##### (2) 中長期炉型戦略全体構想

大型炉から小型炉までを含む、原子炉とサイクルの基本システムとしての革新的原子炉システムを、次世代炉システムと将来炉システムの2つの開発ステップに分ける。次世代炉システムは、信頼性を確保しつつ早期に実用化するシステムと位置付けられ、原子力の競争力強化と燃料サイクルの多様なニーズへの対応が主要課題となる。そのために、次世代炉システムには多様な選択肢の提供が求められる；例えば(1)Pu 多重リサイクル、(2)使用済燃料中間貯蔵、(3)使用済燃料の簡易再処理と「Pu+FP」と「U」の分離保管、(4)Pu サーマル後の使用済燃料貯蔵、(5)以上の複数の組み合わせ、である。一方将来炉システムは、究極・理想のリサイクルシステムの実現を目指すもので、世界的なエネルギーの需要急増への対応や放射性廃棄物変換などの課題がある。

これら基本システムを利用する応用システムとしては、発電システム、熱供給設備、水素製造システム、海水淡水化設備、需要地近接等が考えられる。

##### (3) 革新的原子炉システムの開発目標

次世代炉システムおよび将来炉システムの開発目標を、(1)資源有効利用、(2)経済性、(3)安全性、(4)環境負荷低減、(5)核拡散抵抗性の観点からあげると、次世代炉システムでは(1)持続的エネルギー供給の確保、(2)サイクルを含め実現性の高い技術による競争力の確保、(3)現行炉並みの安全性(負のボイド係数等)、(4)マイナーアクチニド(MA)蓄積量の低減、(5)Pu 単独での存在をなくし、さらにPuを低除染化する、のようになる。

一方将来炉システムでは、(1)エネルギー需要急増への対応、(2)新エネルギーを凌駕する経済性、(3)過酷事故時に退避が不要であり、さらにテロ対策がなされる、(4)MAと長寿命核分裂生成核種

(LLFP) の分離転換、(5)「炉+サイクル」のコロケーションシステム、があげられる。

革新的原子炉システムの開発目標の考え方としては、次世代炉システムでは経済性と柔軟性が最重要で、他の目標は経済性を損なわない範囲で現行炉並み以上とする一方、将来炉システムは、究極理想の原子力システムとして達成すべきレベルのものとする。

#### (4) 革新的原子炉システムの構成と相関

次世代炉システムは低減速炉/先進再処理による Pu 多重リサイクルを基本とし、燃料・制御棒等の入替により、経済性・安全性などを確保しつつ、燃料サイクルを廻る多様なニーズに柔軟に対応可能とする。具体的には、MOX 燃料を用いた稠密格子配列の燃料と、MOX または UO<sub>2</sub> 燃料棒を比較的疎に配列した燃料を入替え、転換比 1 程度の低減速炉心と転換比 0.6 程度の高減速炉心を変換するなどして、先に述べた、Pu リサイクル、Pu サーマル、中間貯蔵、分離保管などに柔軟に対応する。

次世代再処理技術は中長期にわたる原子力利用を支える基本技術であり、官・民の協力による開発実用化が重要である。次世代炉に対する再処理技として、中期対応の次世代再処理技術は高除染の "pure" な MOX を生産しペレットに加工、MA や LLFP 変換を含む長期対応の先進再処理技術は、低除染の "dirty" な MOX を振動充填する技術が考えられる。

## 2. 4. 2 日立の次世代炉概念・技術開発

日立で検討中の次世代炉概念・技術開発例を、原子炉とサイクルに分けて紹介する。

### (1) 原子炉

#### 1) ABWR 改良発展炉 (ABWR-II)

電気出力 1,700MW の大型炉。大容量化と簡素化により経済性を徹底追求する。大型 K 格子炉心や静的崩壊熱除去システムの採用により、炉心設計の柔軟性や炉停止余裕が向上し、過酷事故 (SA) 時の格納容器過圧防護も強化される。これらを生かして、発電コストの低減に加え、高燃焼度化、運転サイクル長期化、MOX 燃料利用など、燃料サイクルへ柔軟に対応することができる。

#### 2) 日立低減速炉 (RBWR)

原研の低減速炉と同様の概念。BWR の特徴を活用し、稠密六角燃料格子、高減速材ボイド率、フォロアー付き制御棒の採用により水対燃料比を低減し、1.0 の高転換率を達成する電気出力 1300MW 級原子炉。エネルギーの長期安定供給と長寿命放射性廃棄物の有効利用に資することができる。

#### 3) ABWR-900

ABWR (電気出力 1350MW 級) の技術を基盤とし、出力を低減しても経済性が悪化しないように、設備の徹底簡素化をはかった、電気出力約 960MW の中型 ABWR。10×10 燃料の採用による高出力密度化、静的・動的システムを組み合わせた安全系、コンパクトな機器配置などの特徴により ABWR と比べプラント建屋全容積を 66%と、出力規模相当にまで小型化している。

#### 4) DMS-400

ABWR-900 からさらにスケールダウンし、かつコストデメリットをおさえた、経済性・初期投資コスト抑制に優れた、電気出力 400MW 級の自然循環型 BWR。日本原子力発電 (株) との協力

で開発している。短尺／自然循環炉心の採用、気水分離器削除、原子炉圧力容器（RPV）と圧力格納容器（PCV）の小型化などにより、建屋容積を ABWR と比べ出力比並みの 32%にまで低減している。

#### 5) 超臨界圧水冷却炉 SCPR

東京大学で検討を進めている、超臨界圧水を冷却材に用いた水冷却炉<sup>[2.4-1]</sup>。超臨界圧水の密度が BWR の減速材ボイド率 60 - 65%に相当するため、低減速炉にも適している。高熱効率やシステム簡素化が可能である。さらに、この SCPR を間接サイクル型とするアイデア<sup>[2.4-2]</sup>を提案し、間接サイクルの特徴を活用したタービン系などの設備合理化と、高温蒸気を活用した水素製造などの熱利用の拡大も考えている。

#### (2) 核燃料サイクル技術

##### 1) FLUOREX 法

低減速炉や FBR が軽水炉と共存する時代向けの再処理技術。フッ化物揮発法は U を選択的に気化し純度を高くできるが、Pu は純度良く取り出せない。そこで PUREX 法を組み合わせ高純度（高除染）の U/Pu を分離する。ペレット型燃料製造に対応した早期導入可能な技術である

##### 2) 改良フッ化物揮発法

低減速炉や FBR の燃料のみでのサイクルに向けた長期対応の再処理技術。フッ化物揮発法により得られる純度の高くない（低除染）Pu は長期的にはむしろ好都合となる。ほぼ球形の粉末形状の  $UO_2/PuO_2$  が得られ、振動充填が可能となる。

#### 参考文献

- 2.4-1. Y. Oka and S. Koshizuka : "Design Concept of Once-ThroughCycle Supercritical-Pressure Light Water Cooled Reactors", SCR-2000, Nov. 6-8, 2000, Tokyo (2000).
- 2.4-2. 木藤和明, 西田浩二, 松浦正義, 志賀重範 : "超臨界圧水冷却炉の実用化に関する技術開発 : 間接サイクル型プラント概念"日本原子力学会 2002 年秋の大会, M22 (2002).

**Q&A** 次世代炉開発へのメーカーの取組み（日立：山下淳一）

[Q] 燃料サイクルに柔軟に対応できる次世代炉概念の話のところで、中間貯蔵が大量になった時に Pu と MA を取り出して U だけを使うという話であったと思うが、どのようなことが次世代炉でできるのか。

[A] U も使わないで分離して管理する。貯蔵量がどんどん増えたときに、貯蔵設備が deadlock になってしまう。考え方としては、本当に難しい管理をしなければならない物質 (Pu+MA) と、比較的ゆるやかに管理できるもの (U) を分離して、管理を柔軟にしてゆくというもの。

[Q] これは FLUOREX を使うのか。

[A] はい。FLUOREX は非常に適している技術であると思う。PUREX の部分を省略すると、U だけを選択的に分離できる。残ったものだけをガラス固化体なりペレット化なりして管理するのに適している

付録 1-5

次世代炉開発へのメーカーの取組み

山下 淳一 (日立)

This is a blank page.

第7回低減速軽水炉研究会資料

# 次世代炉開発へのメーカーの取組み

平成16年 3月5日

株式会社 日立製作所  
山下 淳一

## 目 次

### I 次世代炉開発戦略

1. 基本的考え方
2. 中長期炉型戦略全体構想
3. 革新的原子炉システムの開発目標
4. 燃料サイクルに柔軟に対応する次世代炉概念
5. 先進燃料サイクルシステム

### II 日立の次世代炉概念・技術開発

- ◇ 原子炉
  - [1] ABWR-II [2] ABWR-900 [3] DMS-400
  - [4] RBWR [5] SCPR
- ◇ サイクル
  - [6] FLUOREX法 [7] 改良フッ化物揮発法



## I. 次世代炉開発戦略

-1-

**HITACHI**  
Inspire the Next



### ■ 基本的考え方

- **基本認識**； 我国の原子力開発においては原子炉と燃料サイクルの整合性を持ちつつ、原子力利用範囲を一層拡大する革新的原子炉システムの開発が重要である。
- **開発課題**； 革新的原子炉システムは信頼性確保を前提に、経済性・安全性に優れ、燃料サイクルを廻る状況変化に柔軟に対処し発電、水素製造、熱利用など様々な用途に適用できることが重要である。
- **開発・実用化の進め方**； このように革新的原子炉システムには多様なニーズや多くの開発課題のある事を踏まえ、開発ステップを2段階に分け「次世代炉システム」と「将来炉システム」を並行して開発し段階的に実用化するのが妥当であると考えられる。

-2-

**HITACHI**  
Inspire the Next



## 中長期炉型戦略全体構想

### ■基本システム (大型炉～小型炉)

- 位置付け-
- 主要課題-

#### 革新的原子炉システム(原子炉+サイクル)

##### I. 次世代炉システム

信頼性を確保しつつ、早期実用化

- 原子力の競争力強化への対応
- 燃料サイクルの多様なニーズへの対応

—多様な選択肢の提供—

##### II. 将来炉システム

究極・理想のリサイクルシステム実現

- 世界的エネルギー需要急増への対応
- 放射性廃棄物変換

### ■応用システム

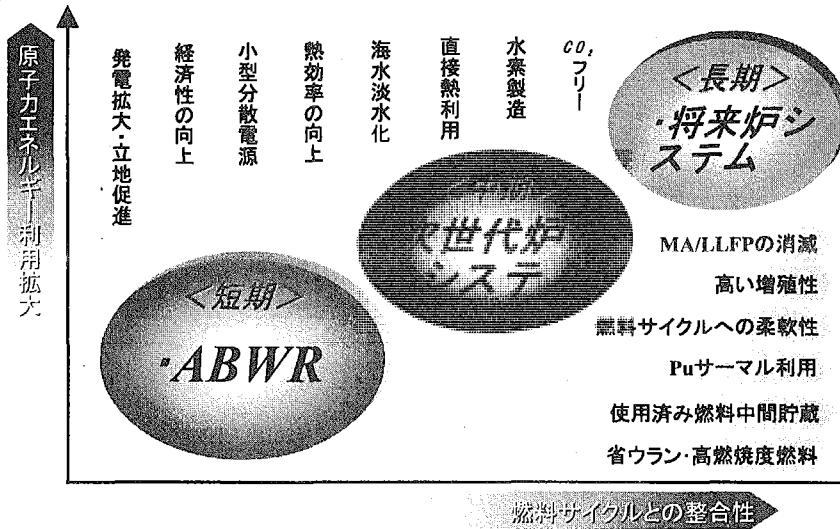
#### 応用システム

発電システム / 熱供給設備 / 水素製造システム / 海水淡水化設備 / 需用地近接 等

#### ◆ 次世代炉システムに求められる選択肢例

- ①Pu多重リサイクル
- ②使用済燃料中間貯蔵
- ③使用済燃料を簡易処理し「Pu+FP」と「U」を分離保管
- ④Puサーマル後に使用済燃料貯蔵
- ⑤上記の複数の組み合わせ

## 中長期炉型開発ビジョン





## 革新的原子炉システムの開発目標

### I. 次世代炉システムの目標

### II. 将来炉システムの目標

● 資源有効利用	・ 持続的エネルギー供給確保	・ エネルギー需要急増への対応
● 経済性	・ 実現性高い技術で競争力確保(含サイクル)	・ 新エネルギーを凌駕(含サイクル、分離)
● 安全性	・ 現行炉並み(負のボイト係数等)	・ 苛酷事故時退避不要/テロ対策
● 環境負荷低減	・ MA蓄積量の低減	・ MA、LLFPの分離、転換
● 核拡散抵抗性	・ Pu単独存在無し/Pu低除染化	・ 「炉+サイクル」のコロケーションシステム

#### 開発目標の考え方

##### <次世代炉システム>

- ・ 経済性、柔軟性が最重要。
- ・ 他の目標は経済性を損なわない範囲で現行炉並み以上とする。

##### <将来炉システム>

- ・ 究極理想の原子力システムとして、達成すべきレベルのものとする。

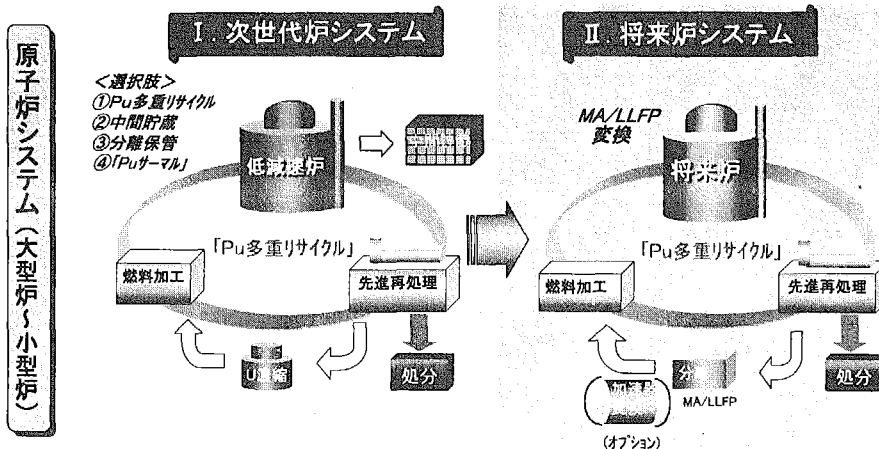
-5-

**HITACHI**  
Inspire the Next



## 革新的原子炉システムの構成・相関

次世代炉システムは低減速炉/先進再処理によるPu多重リサイクルを基本とし、燃料サイクルの多様なニーズに柔軟に対応できるものとする

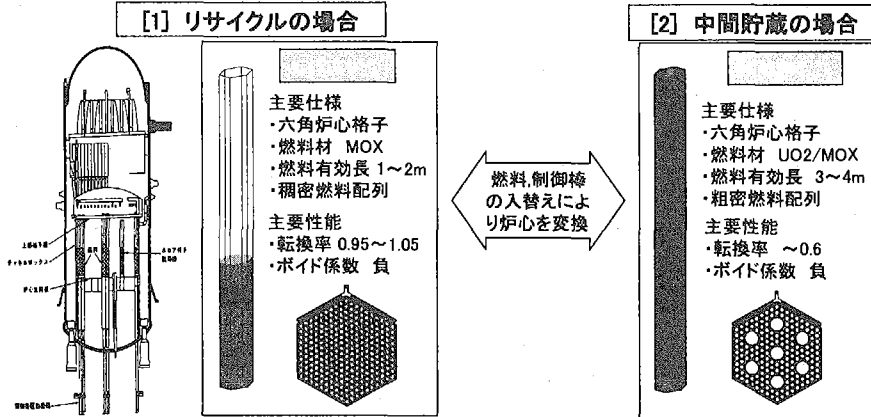


-6-

**HITACHI**  
Inspire the Next

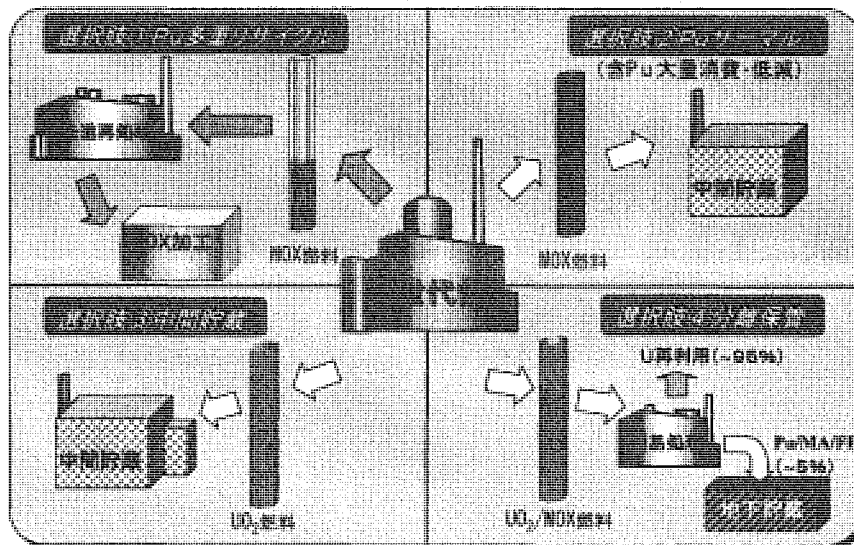
## 燃料サイクルに柔軟な次世代炉概念

次世代炉は燃料・制御棒等の入替えにより、経済性・安全性等を確保しつつ、燃料サイクルを廻る多様なニーズに柔軟に対応可能とする



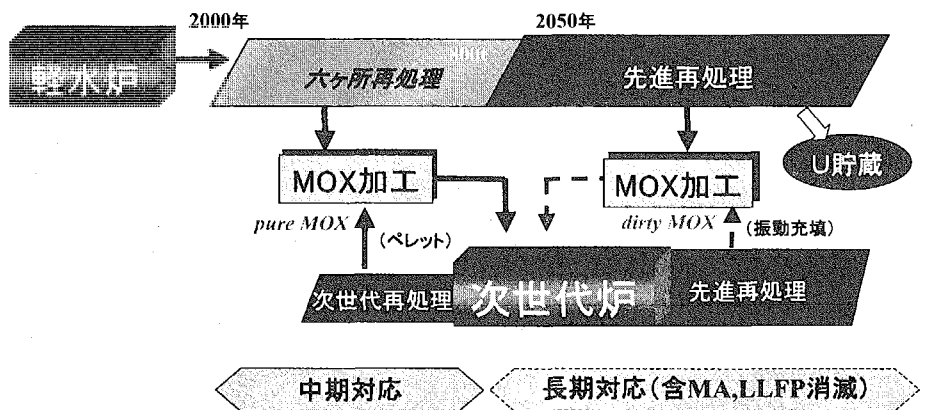
<六角格子、Y字形下部挿入制御棒を用いたBWRの場合>

## 次世代炉による多様な燃料サイクル選択肢



次世代炉と先進再処理技術

次世代再処理技術は中長期にわたる原子力利用を支える基本技術であり官・民の協力による開発実用化が重要。



-9-

HITACHI  
Inspire the Next



II. 日立の次世代炉概念・技術開発例

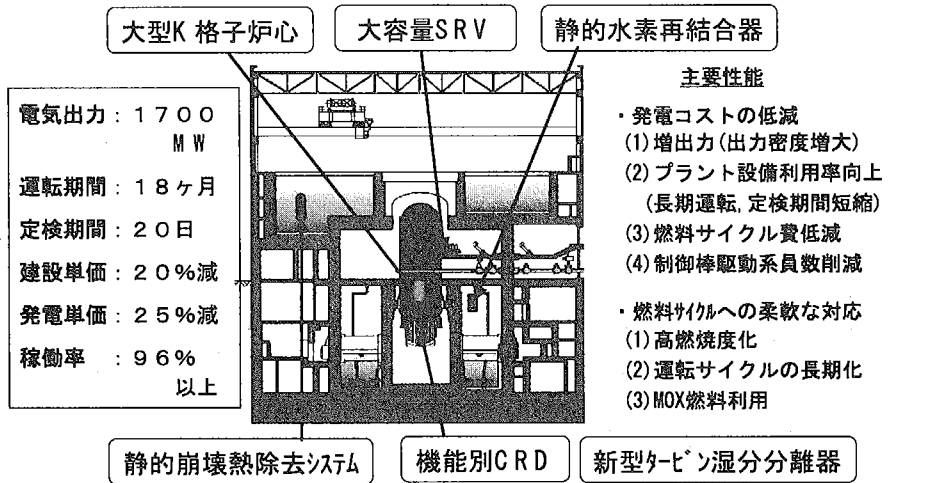
-10-

HITACHI  
Inspire the Next

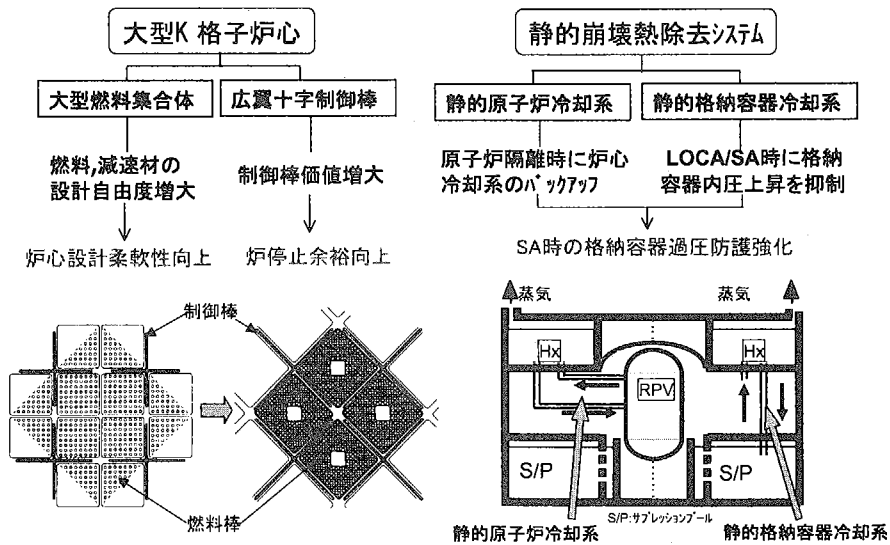


# ABWR改良発展炉 (ABWR-II)

簡素化・大容量化による経済性の徹底追求



# ABWR改良発展炉 (ABWR-II) の特長

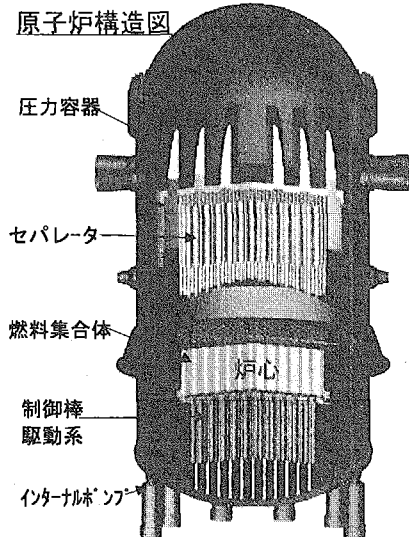




## 日立低減速炉(RBWR)

RBWR : Resource-Renewable BWR

原子炉構造図



項目	単位	RBWR
電気出力	MWe	1356
原子炉圧力	MPa	7.2
炉心外接半径	m	2.88
燃料集合体数		720
平均燃焼度	GWd/t	50
有効炉心長	m	1.15
炉心流量	10 <sup>4</sup> t/h	3.2
炉心出口クオリティ	%	28
炉心平均ポイド率	%	59
炉心圧力損失	MPa	0.16
転換比		1.01

-13-

**HITACHI**  
Inspire the Next

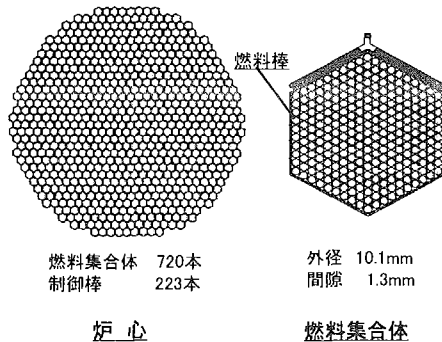


## 日立低減速炉(RBWR)の特長

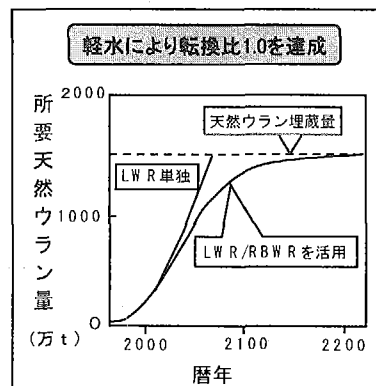
BWRの特長を活用して高転換率達成:

水対燃料  
比の低減

- ・稠密六角格子
- ・高ポイド率(低炉心流量)
- ・フロアー付き制御棒



- ・エネルギー長期安定供給
- ・長寿命放射性廃棄物の有効利用



-14-

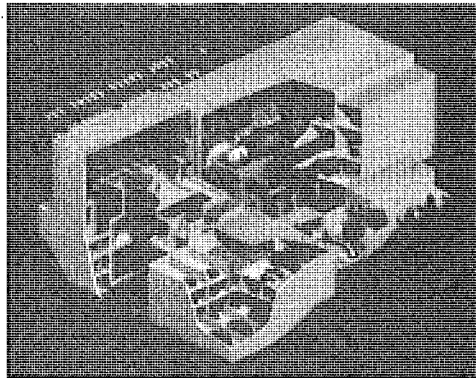
**HITACHI**  
Inspire the Next

## ABWR-900

ABWRは出力が960MWの炉であり、従来のABWRに比べて出力密度が約2倍、主蒸気発生器が4基、RIPが4基とコンパクトな機器配置を実現している。

- 現行ABWR技術に基づく設備の徹底簡素化
- 標準BWR燃料実績に基づく炉心設計
- 次世代炉技術の積極取り込み

	ABWR-900	ABWR
電気出力	960MWe	1356MWe
出力密度	59.8kW/l	50.6kW/l
主蒸気ライン	700A x2	700A x4
RIP台数	4RIPs	10RIPs
安全系	静的システム2系統 動的システム4系統	動的システム6系統

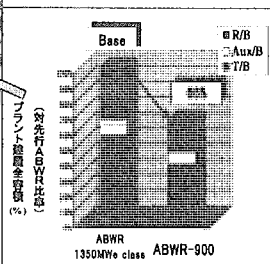
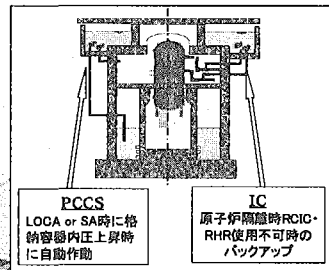
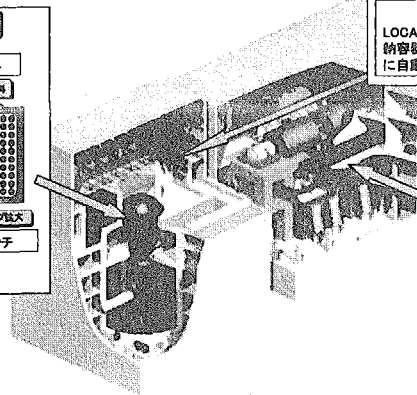
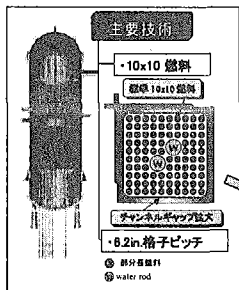


-15-

**HITACHI**  
Inspire the Next

## ABWR-900の特長

- 特徴**
- 10×10燃料の採用による高出力密度化
  - 静的・動的システムを組み合わせさせた安全系
  - コンパクトな機器配置



-16-

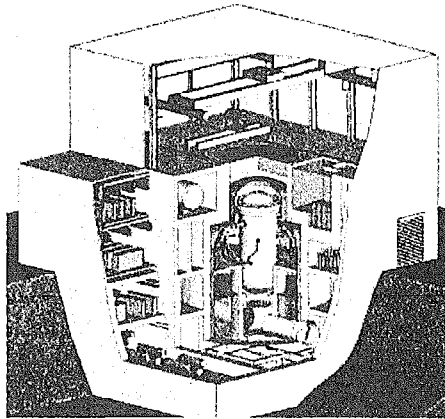
**HITACHI**  
Inspire the Next

# DMS-400

経済性・初期投資コスト抑制に優れた400MW級自然循環型BWR

- 設備コスト抑制
  - 短尺／自然循環炉心採用
  - 気水分離器削除
  - RPV、PCVの小型化
- 建設コストの抑制
  - 建屋容積の低減
  - 鋼製格納容器採用
  - PCVと建屋躯体の一体工法

DMS: Modular Simplified Medium Small Reactor



原子炉廻り仕様比較

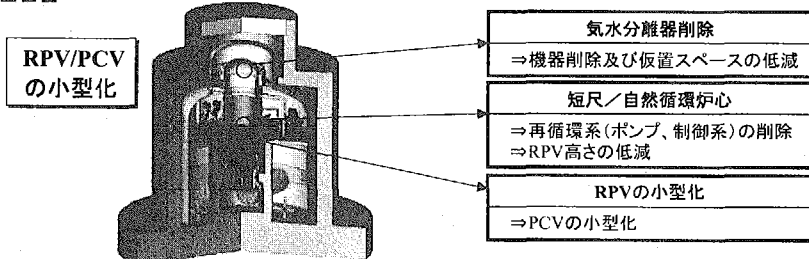
項目	ABWR	DMS-400
① 熱出力	3926MWt	1200MWt
② 燃料集合体	872体	568体
③ 有効燃料長	9.7m	2.0m
④ RPV内径	7.1m	約6.8m
⑤ RPV高さ	21m	約15.5m
⑥ 再循環系	強制循環	自然循環
⑦ 気水分離機	有	無



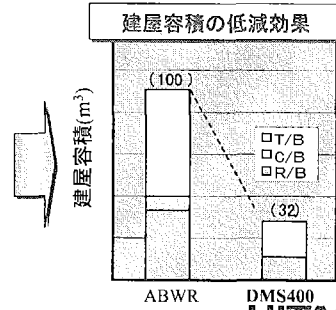
-17-

HITACHI  
Inspire the Next

## DMS-400の特長



	DMS-400(400MWe)	ABWR(1356MWe)
図	PCVの小型化 	
径(D)	約17m	約29m
高さ(H)	約24.5m	約36.2m
容積/出力	1.0	1.0



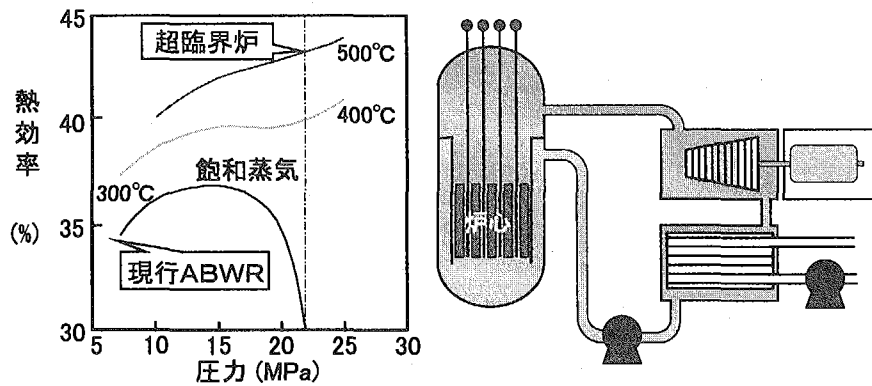
-18-

HITACHI  
Inspire the Next



## 超臨界圧水冷却炉—SCPR—

<b>発電性能向上</b>	<b>システム簡素化</b>	<b>早期実用化</b>
火力発電並の熱効率	・機器合理化、小型化 ・再循環系、気水分離系なし	超臨界圧タービン技術、 軽水炉技術の活用



Y. Oka and S. Koshizuka, SCR-2000, Nov. 6-8, 2000, Tokyo "Design Concept of Once-Through Cycle Supercritical-Pressure Light Water Cooled Reactors"

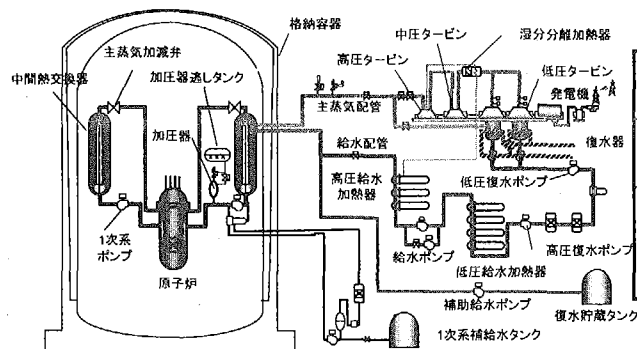
-19-

**HITACHI**  
Inspire the Next

## 間接サイクル型SCPR

特長:

- ・間接サイクルの特徴を活用したタービン系等の設備合理化。
- ・高温蒸気(約500°C)を活用した熱利用(水素製造他)の拡大。



<仕様例>

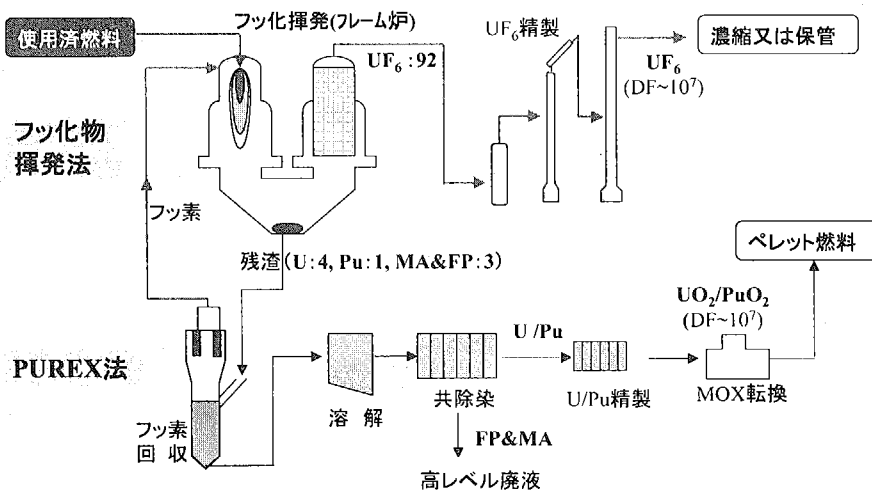
出力	2270MWt/953MWe (効率:42%)
圧力	25/24MPa (1次系/2次系)
温度	入口/出口温度 280/508°C (1次系) 250/470°C (2次系)

<出典> 木藤和明, 西田浩二, 松浦正義, 志賀重範 日本原子力学会2002年秋の大会, M22 (2002)  
「超臨界圧水冷却炉の実用化に関する技術開発: 間接サイクル型プラント概念」

-20-

**HITACHI**  
Inspire the Next

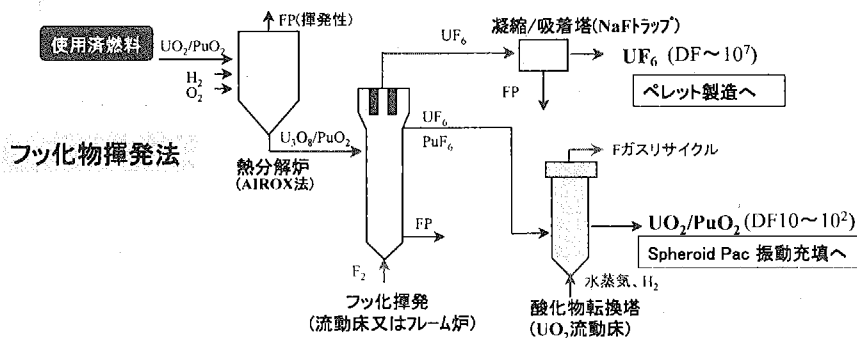
**FLUOREX法 -軽水炉共存時代向け-**



-21-

**HITACHI**  
Inspire the Next

**改良フッ化物揮発法(低減速炉,FBR両用)**



【Spheroid Pac 振動充填燃料製造の特徴】

燃料名称	粉末製法	粉末形状	特徴
Spheroid Pac (仮称)	 (フッ化物揮発法)	 (ほぼ球形)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・弱振動充填が可能</li> <li>・粉末粒径：広範囲</li> </ul>

-22-

**HITACHI**  
Inspire the Next