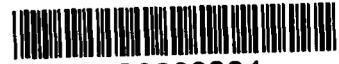


KAERI/RR-1602/95



KR9600224

# 상온 핵 융합

Cold Fusion

1996. 1.

한국원자력연구소

VOL 20권 05

KAERI/RR-1602/95

# 상온 핵 융합

Cold Fusion

1996. 1.

한국원자력연구소

# 제 출 문

소 장 귀하

본보고서를 상온핵융합에 관한 과제의 실적 보고서로 제출합니다.

1996. 1. .

연구 실명 : 핵융합연구분야

과제책임자 : 서 석용

연 구 원 : 유 재준

감수 위원 : 김 성규

# 요 약 문

1. 제목 : 상온핵융합
2. 연구 개발의 목적 : 신형 에너지원 개발
3. 연구 내용 및 범위 :
  - 0 D-D nuclear reaction in condensed matter
  - 0 전 세계적 기술 추적
    - 위에서 기술적 타당성 검토 후 특정 방법 선택
    - 위 선택된 방법에 관한 집중적 기술 검토
    - 약간의 관련 기초 실험
4. 중단 사유 및 지금까지의 연구실적 또는 연구 진행 과정 :
  - 0 중단 사유 - 지시
  - 0 연구 진행 과정 - 기술 추적
    - 특정 방법 선택
    - 위 관련 문헌조사 및 연구
5. 중단 후 향후 활용 방안 :
  - 0 과제 연속 수행 가능 시 - 모든 기술정보 활용
  - 0 과제 연속 수행 불가능 시 - 미지수임

# 목 차

제1장 서론

제2장 본론

제1절 기술 추적

제2절 기술 검토

제3절 중단 사유

제3장 중단 후 향후 활용방안 및 건의사항

제4장 그림, 표 및 참고문헌

제5장 참고 논문

## 제1장 서론

소위 상온핵융합 현상은 1989, 3월 Fleishman 교수에 의하여 제기되어 세계적인 연구 선풍을 일으킨 바 있다. 그 후 약 3년간 활발한 연구활동이 지속되었으나, 차츰 그 진실성을 의심 받기 시작하였다. 그러나 약 200명 이상 되는 학자들이 아직도 그 가능성을 추구하고 있는 이유는 불명확한 원인에 의한 반응열이 발생한다는 부인하기 어려운 현상이 발생하기 때문이다.

따라서 한국 원자력 연구소도 불명열에 관한 기술추적의 필요성을 가지고 1인 소형 과제를 수행하도록 하였다.

전반적인 기술추적을 하고, 분석하여 약간의 타당성이라도 보이면 그에 관한 집중적인 기술검토 연구가 본 연구의 기본 목적이다.

연구 결과는 부득이한 과제 중단으로 인하여 명확한 결론을 내릴 수는 없지만 지금까지의 검토로 미루어 볼 때 불명열이 발생한다는 현상 자체는 부인하기 어려운 듯 하고, 단지 그 원인을 아직도 찾지 못하고 있다.

현 시점에 선진국에서 실험하는 Calorimeter 는 대단히 정교하여 오차를 무시하여도 좋을 만 하다. 따라서 Input 과 Output 의 비교치는 매우 믿을 만 하다. 더구나 거의 모든 실험이 Low energy state 이기 때문에 장기간에 걸쳐서 수행하는 것이 보통이다. 즉 우발적 data 는 즉시 알 수 있다. 문제는 발열 원인을 아직 설명하지 못하고 있는데 있다.

본론에 있는 이론 물리학자들이 설명하려고 애를 쓰지만 아직 수궁할 만한 것이 없는 실정이다.

우리도 좀더 기술추적을 하고 약간의 재현실험을 할 필요가 있다고 본다.

## 제 2 장 본 론

### 제1절 기술 추적

현재 소위 상온 핵융합에 관한 연구를 하는 나라는 참여자의 수자로 보면 미국이 단연 많고 다음이 일본이다. 역시 강국들이 많은 연구인력을 할애한다는 것을 알 수 있다. 연구 자금 면에서는 단연 일본이 앞선다.

미국은 거의 개인 또는 약간의 취미활동이라고 볼 수 있는 형태로 연구를 하고 있으나 일본은 NHS계획이라는 통산성 주관의 계획에 의하여 상당히 조직적으로 연구활동을 하고 있다. 따라서 사실은 일본의 연구가 얼마나 진척되었는 지는 약간의 미지수이다.

다음 지금까지는 수수방관하던 프랑스 학계가 갑자기 연구를 시작한 이유도 불명확하다.

그러나 전반적인 연구열의는 매우 저조한 것이 사실이다.

기술 추적한 내용을 연구 분야별로 분류하고 설명한다.

불명열 (이하 과잉열이라 함) 에 관한 실험 결과 (1994 년도)는 상당히 많다. 그 중에서 주목할 만한 것들은 다음과 같다.

그림 1에 나타난 바와 같이  $LaAlO_x$  에 중수소 가스를 흡수시켜 전압을 걸었을 때 과잉열이 발생하는지를 연구하였다[1]. 그 결과는 그림 2에 나타나 있다.

매우 흥미 있는 연구 방향이라고 볼 수 있다. 지금까지는 주로 전해방식에 의하여 Pd 에 중수소를 흡수시켰으나 이 연구는 고체 Ceramic 에 중수소를 흡수시킨 것이 특이하다.

본 연구원도 흥미를 가지고 재현실험을 하려고 시도하였으나 단결정 성장 장치를 사용할 수 있는 기회를 얻지 못하여 중단하였다.

그림 3,4에 도시된 연구결과는 매우 주목할만 하다[2]. 즉 과잉열 발생의 Pattern 을 한눈에 볼 수 있다.  $\sigma=0.651$  정도로 과잉열 발생량이 크지 않고 불규칙하다는 것을 알 수 있고 또한

흡수 Matrix 에 따라서 대단히 큰 차이가 있음을 알 수 있다. 역시 뚜렷한 Nuclear reaction ash 가 없다는 특징은 공통적인 것이다.

Tritium 은 자연계에도 상당량이 존재한다. 따라서 D-D 또는 H-H Fusion 에 의한 Tritium 측정에는 애로가 많고 (오염), 측정치의 신뢰성에 문제가 있다.

표 1에 나타난 량 정도로 Back ground 치를 많이 초과하는 경우에는 재현성을 차치하고 일단 특이현상이라고 보아야 한다[3].

위 실험은 Ti wire 에 수소를 흡수시키고 전류를 통하여 얻은 가스를 분석한 것이다.

만약 재현성이 발견될 경우에는 상당한 평가를 받을 수 있을 것이다.

그림 5에 나타난 Burst counts 는 매우 고무적인 Data 이다. 왜냐하면 Neutron 은 다른 Ash와 달라서 자연계에 거의 존재하지 않기 때문에 그 신뢰성이 매우 높다.

그러나 본 연구원의 경험에 비추어 볼 때 측정회로에 침입하는 Noise 를 철저히 차단하지 못하는 한 수치를 믿을 수 없다. 즉 감지기를 비롯한 모든 측정기를 도전성 Cabinet 에 수용하고 외부 잡음을 발생시켜 그 영향 정도를 확인하여야 한다.

소위 상온 핵융합에 관련된 이론은 매우 많은 사람들이 매우 다양한 이론을 전개한 바가 있다. 그러나 대부분 학술적 근거가 희박하다.

주로 이 분야에 활동하는 이들은 MIT 대학의 Hagelstein 교수, Purdue 대학의 Kim 교수, Milano 대학의 Preparata 교수, Hawaii 대학의 Li 교수등이 오래 동안 심혈을 기울이고 있다.

이들 중에서 Li 교수의 학설이 상당한 설득력이 있기 때문에 요지만 간략히 소개한다.

1928년 Gamow는 알파 입자의 Coulomb barrier penetration (by tunneling) 현상을 연구하고 충돌 회수와 Decay time (event duration) 관계를 도출하였다. 그리고 불확정성 원리에 의하면 그 시간은 역시 Energy level과 역수의 관계를 가진다. 그런데 Energy level 넓이는 k vector와 관련이 있고, 즉 k 치와 Nuclear well size와의 곱이 중요한 의미를 가진다.

계산 결과는 Condensed matter에서의 D-D fusion characteristic

time은 약 10,000초 정도가 된다는 상당히 의미 있는 제안을 하였다. 실측치와 유사하다. 즉 상온 핵융합은 근본적으로 매우 느린 반응이란 결론이다.  
참고를 위하여 위 논문을 부록으로 전제한다 (본인이 본 연구원에게 직송한 것임).

기타 인간이 상상할 수 있는 온갖 종류의 제안이 있으나 별 가치가 없는 듯 하다.

## 제2절 기술 검토

위와 같은 여러 기술 정보를 분석 검토한 결과  $LaAlO_x$ 를 이용한 상온 핵융합에 관한 연구가 매우 바람직하다는 결론을 얻었으나, 단결정 성장시설 이용에 차질이 생겨 결국 재현 실험을 할 수 없었다. 장차 기회가 주어지면 꼭 한번 시도하여 볼 가치가 있다고 판단된다.

1993년도 본 연구 보고서 (KAERI RR/1426-94)에 제안된 Heavyfermion을 이용한 fusion도 결국 Ultra pure alloy (Levitation furnace 국내 없음) 시설 부족으로 시도하지 못하였고 금년도도 또 과제 중단 등으로 실현하지 못하였음을 유감으로 생각한다.

그러나 위의 어느 경우에도 제안된 바가 없는 독자적인 모델을 구상하고 약간의 기초 실험을 하고 있었다는 점은 매우 고무적이다.

즉 본 연구원이 엄청난 기술 정보를 소화한 결론은 좀더 새로운 현상에 입각한 방법이 효율적이라 판단되어 다음과 같은 제안을 한다.

Exciton에 의한 Defect creation은 이미 공지의 사실이다 [4][5][6]. 그런데 Exciton 중에서도 Frenkel type이 아닌 Wannier type에 주목하였다. 이는 주로 Negative U 이론으로 설명하는데 결국 반경이 Lattice dimension의 수십 배 이상이 되는 Weak bonded exciton으로서 고체(주로 부도체) 공간을 제한 없이 이동할 수 있다[7]. 바로 아무 Restriction 없이 어떤 공간에도

존재할 수 있다는 점이 주목해야 할 점이라고 판단 된다. 즉 어떤 시점에서 고체 구성 원자의 Valence를 순간적으로 바꾸어 줄 수 있고[8] (이 점이 이미 입증된 Defect creation의 이유) 그때 그 원자는 Excess coulomb force로 이동을 하면서 만약 조건이 만족되면 충돌할 수도 있다는 개념이다.

이에 관련된 약간의 기초실험을 한 바가 있다.

즉 금속을 수소화하고 미리 계산된 광자를 흡수시킨다. 그 결과를 중성자 발생과 삼중수소 발생으로 검토한다.

이 실험은 한창 진행중에 과제 중단 명령을 받았기 때문에 현시점에서 그 유용성을 말하기는 어렵다. 그러나 1차 실험에서 약 30초에 3 개의 중성자(배경복사 약 6개/시)가 검출된 바가 있지만 후속 재현 실험을 할 시간적 여유도 없고 과제중단으로 실험의 필요성을 느끼지 못하여 매우 안타깝게 여기는 바이다.

### 제3절 중단 사유

본 연구원은 왜 중단 명령이 하달되었는지 잘 모름

### 제3 장 중단 후 향후 활용방안 및 건의 사항

#### 활용 방안

만약 과제 계속의 후속 조치가 취해진다면 위의 모든 기술 정보 및 독창적 구상에 관한 실험을 계속할 수 있지만 그렇지 못할 경우에는 개인 비용을 투입하여 수행하기에는 매우 힘든 과제라고 생각되며 결론은 아깝지만 전부를 중단하지 않을 수 없다. 최종 중단되었을 경우 활용 방안은 아마도 태양열 전지 등에 활용될 수 있으리라 추측한다.

#### 건의 사항

강력한 권력을 가진 국가기관이 모종의 조치를 집행할 때는 매우 신중하게 처리함이 좋을 듯 하다.

## 참 고 문 헌

- [1] J.P.Biberian, "Excess Heat Measurement in AlLaO<sub>3</sub> Doped with Deuterium", Proceedings of The 5th International Conference on Cold Fusion, Monaco, 1995.
- [2] A.Takahashi, T.Iniguchi, Y.Chimi, T.Ikegawa, N.Kaji, Y.Nitta, K.Kobayashi, M.Taniguchi, "Experimental Correlation between Excess Heat and Nuclear Products", Proceedings of The 5th International Conference on Cold Fusion, Monaco, 1995.
- [3] T.K.Sankaranarayanan, M.Srinivasan, "Evidence for Tritium Generation in Self-heated Nickel Wires Subjected to Hydrogen Gas Absorption/ Desorption Cycles", Proceedings of The 5th International Conference on Cold Fusion, Monaco, 1995.
- [4] J.Singh, "Excitation Energy Transfer Processes in Condensed Matter - Theory and Applications", Plenum, N.Y., 1994.
- [5] N.Itoh, A.M.Stoneham, A.H.Harker, "The Initial Production of Defects in Alkali Halides: F and H Center Production by Non-radiative Decay of the Self-trapped Exciton", J.Phys.C:Solid State Phys., Vol. 10, 1977.
- [6] P.Peyla, Y.M.d'Aubigne, A.Waiela, R.Romestain, H.Mariette, M.D.Sturge, N.Magnea, H.Tuffigo, "Exciton Binding Energy and the Valence-band Offset in Mixed Type-1 Type-2 Strained-layer Superlattices", Phys. Rev. B 46(3), 1992.
- [7] N.Itoh, K.Tanimura, "Radiation Effects in Ionic Solids", Radiation Effects 98, 1986.
- [8] P.C.Souers, F.J.Ackerman, T.J. Biel, J.Bigwood, V.Brite, L.D.Cristensen, C.L.Folkers, V.Gede, C.M.Griffith, E.B.Huss, R.Lindahl, T.McCreary, H.H.Otsuki, R.L.Pond, G.D.Snider, C.Stanhope, R.K.Stump, F.Vanderhoofven, R.T.Tsugawa, J.L.Anderson, D.W.H.Carstans, W.L.Drumhiller, W.B.Lewis, J.E.Nasise, F.E.Pretzel, E.G.Szlarz, D.T.Vier, R.C.Bowman, A.Attalla, "Swelling and Outgassing of Heavily irradiated Lithium Hydride" J. Nuc. Materials 154, 1988.

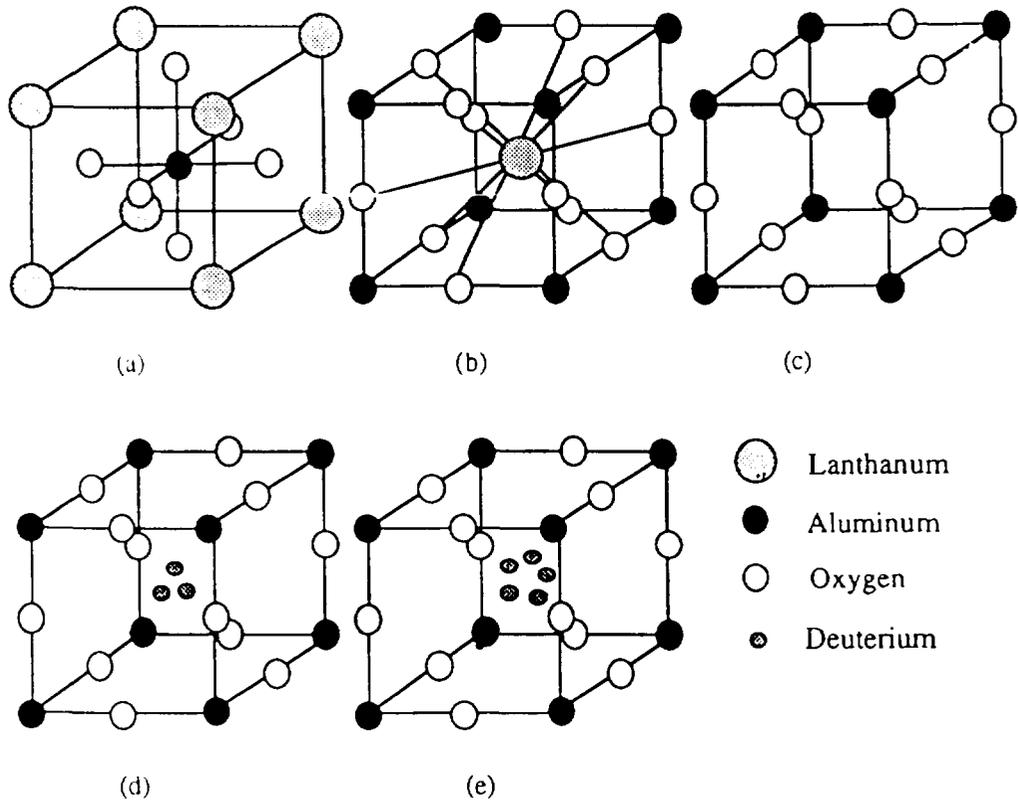


그림 1

Perovskite 형의  $\text{LaAlO}_3$  의 격자 단위. a) 정상 상태 b) 정상 상태 c) V-center, La 원자 탈락 상태 d) 위 상태에 중수소 원자 3개가 존재 e) 같은 상태에 5개가 존재

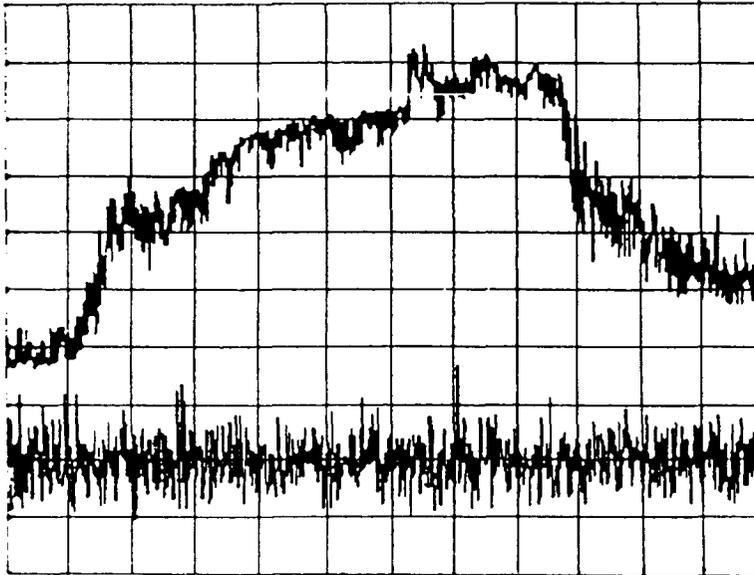


그림 2

위 곡선: 시료 온도 Y축 전체 5도 X축 18 시간. 아래 곡선: 중성자 개수

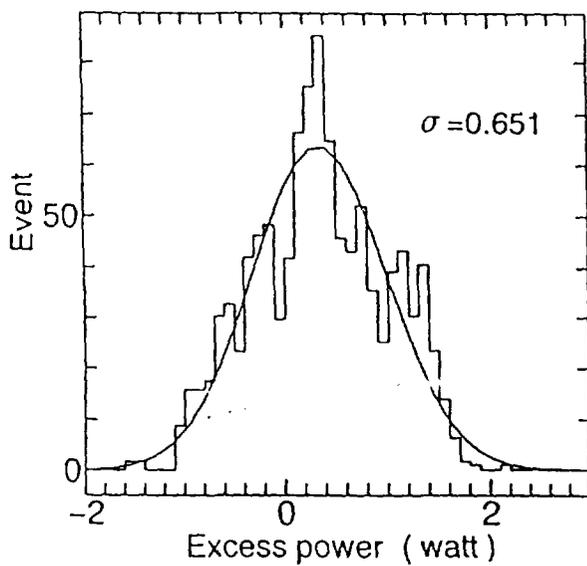
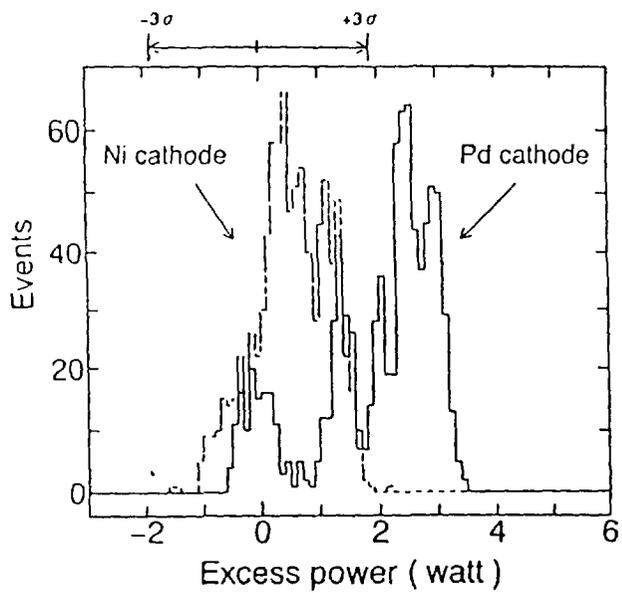


그림 3  
Power-balance Data 의 분포도



Electrolysis : High mode

그림 4  
과잉열 분포도

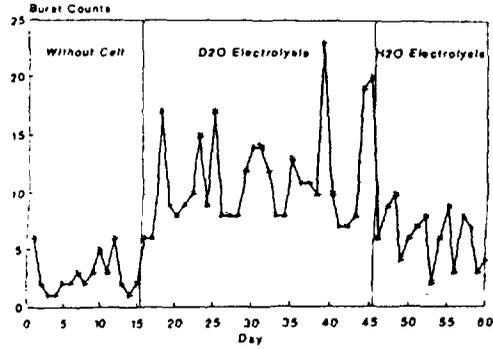


그림 5  
실험 일수에 따른 Burst 개수 기록

Sr. No.	Dissolved Cut Wire Sample #	Average Excess Over Background Counts* per 10 minutes (1 ml Solution)	Total Tritium* Activity in Cut Wire piece (5 ml Solution) (Bq)
1	23/1	313	13
2	501/1	532	22
3	504/4	152	6
4	504/5/I	70	3
5	504/5/II	103	4
6	24/1	440	18
7	24/2	690	28
8	24/3	1150	47
9	27/1	950	38
10	27/2	704	28
11	27/3	57650	2333
12	30/1	1560	63
13	30/2	220	9
14	30/3	550	22
15	Standard	4200	170

\*Background count rate was approximately 250 counts in 10 minutes. 10 % in excess of BG represents limit of sensitivity

표 1  
수소를 흡수 방출시킨 Ni 선을 용해하여  
발생된 기체중 삼중수소의 량

# Solving the Puzzle of Excess Heat without Strong Nuclear Radiation

Xing Zhong LI\*

Department of Physics, Tsinghua University  
Beijing 100084, CHINA

\*Current address: Dept. of Chem., Univ. of Hawaii, Honolulu, HI 96822-2275, USA

## Abstract

Five experimental evidences show that the excess heat is from a nuclear source with a life-time of  $10^4$  seconds. This life-time is shown to be related to the barrier penetration number,  $\theta$ , in terms of the resonance penetration theory. The boson nature of the deuteron ion ( $D^+$ ), and the deuteron energy band structure in lattice play the critical roles in filling the corresponding narrow resonance energy level. Prof. J. Huizenga's challenge of three miracles<sup>[1]</sup> is answered, and "excess heat" without strong nuclear radiation is a reasonable phenomenon. It predicts: (1) there must be a critical loading ratio; (2) the greater the grain size and the activation energy are, the better the reproducibility.

## 1. Introduction

After six years of studies on the "cold fusion" phenomenon, two facts are established: (1) Under certain conditions there is "excess heat" of several watts per cubic centimeter of palladium; (2) There are no commensurate neutrons, tritons, or  $\gamma$ -radiation in parallel with the "excess heat" which is of non-chemical origin. The regression is that: instead of using the neutron signal to convince people to believe there is any nuclear reaction, we attempt to explain that these two facts are due to the existence of a long life-time nuclear resonance state inside a lattice.

Early in 1928, Gamow proved that the life-time of an  $\alpha$ -radiation nuclide,  $\tau_\alpha$ , was determined by the Coulomb barrier penetration number,  $\theta$ .<sup>[2]</sup> At that time the  $\alpha$ -particle after disintegration was a free-moving particle, and  $\tau_\alpha \propto \theta^2$ . Now the penetration of the Coulomb barrier happens in a reverse direction and in a different environment: the lattice confined deuteron penetrates the Coulomb barrier and enters a resonance state. The life-time of this resonance state,  $\tau_{rh}$ , is determined by the  $\theta$  again, but  $\tau_{rh} \propto \theta$ . Now  $\tau_{rh}$  is linearly proportional to the  $\theta$  due to the discrete nature of the energy level of the lattice confined deuteron which is different from the continuum of the free-moving deuteron.

We will start from the experimental evidences of this long life-time state (section 2); then, we calculate this life-time based on the nuclear resonance theory (section 3). In order to fill this resonance state, this theory requires a critical loading ratio which is another well-established experimental fact in the past five years (section 4). Finally, we discuss the famous challenge of three miracles (section 5), and the conclusion (section 6).

## **2. Evidences for Long Life-time State**

The strongest evidence is from the ‘heat after death’.<sup>[3]</sup> The boiling-to-dry electrolytic cell was kept at about 100 °C for three hours without any power input. It clearly showed that the ‘excess heat’ source was inside the palladium deuteride. The reliable calorimetric calculation proved that the energy released in this 3 hours was 20 times greater than the heat of combustion possibly released by the deuterium stored in this system. This was a nuclear active state with a life-time of  $10^4$  seconds.

The second evidence is from the ‘heat after life’.<sup>[4]</sup> The SRI electrolytic cell was a closed cell. It was not driven to boil. However, when the electrolysis was shut down, and input power was zero, the system did not cool down as a source-free system. The flow-calorimeter clearly recorded that there was an energy source inside the system. The first peak of the ‘excess power’ was about 100 mW (the accuracy and the precision of that experiment was  $\pm 10$  mW), and the width of that peak was about 3 hours again. The energy released in these three hours was also about 10 times greater than the heat of combustion possibly released by the deuterium available in the palladium electrode. This was again a nuclear active state with a life-time of  $10^4$  seconds.

During the ICCF-5, J.P. Biberian’s ‘excess heat’ data <sup>[5]</sup> showed that after the shut down of the input power, the ‘excess heat’ continued for 3–4 hours. Although there was no palladium lattice, an AlLaO<sub>3</sub> single crystal provided the lattice confined deuterons. Once again the life-time of that ‘excess heat’ source was of the order of  $10^4$  seconds.

In the ‘Critical Review of the ‘Cold Fusion’ Effect’,<sup>[6]</sup> E.Storms talked about the replacing time of the palladium deuteride. When he put the deuterium-loaded electrode into the light water cell, he observed the ‘excess heat’ continuing for the first several hours. He called this time the replacing time, because he considered that when the deuteride was replaced by hydride, the ‘excess heat’ was supposed to stop. From another point of view, this showed that the life-time of the nuclear active state was again of the order of  $10^4$  seconds.

After my talk in ICCF-5, M.Eisner of the University of Houston was so kind as to give me his 1989 data for the ‘excess heat’.<sup>[7]</sup> It clearly showed that the width of the first ‘excess power’ peak after the shut down of the electrolysis was once again of the order of  $10^4$  seconds.

It was not realized that the answer to Prof. J.Huizenga’s challenge of three miracles has been indeed implied in this long life-time of nuclear active state.

## **3. Theory of Resonance Penetration for Lattice Confined Ions**

The life-time of a quantum mechanical state,  $\tau$ , is related to the width of its energy level,  $\Gamma$ , by the uncertainty principle:

$$\tau \approx \frac{\hbar}{\Gamma} \quad (1)$$

The width of the energy level can be expressed by the imaginary part of the wave number,  $k'$ , through the identity:

$$\Gamma = |\text{Im}U| \equiv \frac{\hbar^2}{m} k' k' \quad (2)$$

Here  $\text{Im}U$  is the imaginary part of the potential well  $U$ ,  $k'$  and  $k'$  are the real and imaginary part of the wave number  $k$ , respectively.  $k^2 \equiv \frac{2m}{\hbar^2}(E - U)$ .  $E$  is the total energy of the relative motion of the two deuterons. When the energy  $E$  coincides with the energy level inside the nuclear well,  $(k'a) \approx O(1)$ . Here  $a$  is the size of the nuclear well. However

$$|k'a| \approx O(\theta^{-1}) \quad (3)$$

for this resonance. Here  $\theta$  is defined as

$$\theta \equiv \exp\left[\int_a^{\dagger} \sqrt{\frac{2m}{\hbar^2}(U - E)} dr\right] \quad (4)$$

and  $\theta^{-2}$  is just the famous Gamow barrier penetration factor. Equation (3) has been rigorously proved for the square well case,<sup>[8]</sup> and for the arbitrary potential configuration.<sup>[9]</sup> Here we just explain why the imaginary part of the wave number,  $k'$ , should be such a small number in order to have a resonance penetration. As we know, when  $k' < 0$ ,  $k'$  determines the damping of the wave function. The wave  $e^{-ik'x}$  will be damped by a factor of  $\exp[-|k'a|]$  when the wave propagates through a length of  $a$ . On the other hand the Coulomb barrier suppresses the amplitude of the penetrating wave function by a factor of  $\theta^{-1}$ . In order to use the resonance effect to build-up the wave amplitude to its initial value in terms of the constructive interference between the reverberating wave and the penetrating wave, we need at least  $\theta$ -times reverberation before the wave is damped. So we need  $|k'(\theta a)| \leq O(1)$ , or  $|k'a| \leq O(\theta^{-1})$ .

Consequently, substituting  $k'$  and  $k''$  in eq.(1) and (2), we have the life-time for “excess heat”

$$\tau_{\text{xb}} \approx \frac{ma^2}{\hbar} \theta \quad (5)$$

For the d+d interaction,  $m \approx 10^{-24}$  g.,  $a \approx 10^{-13}$  cm,  $\theta \approx 10^{27}$ , <sup>[10,11]</sup> we have  $\tau_{\text{xb}} \approx 10^4$  sec. The theory just gives the correct order of magnitude of the life-time of the nuclear active state.

#### **4. Bose Condensation and the Critical Loading Ratio**

Such a long life-time state corresponds to a very narrow energy level in the order of  $10^{-19}$  eV. This is the reason why we could not observe this resonance level in any low energy beam-target experiment.<sup>[12]</sup> Because the beam energy distribution is much wider than the width of the resonance energy level, it is an analogy to using a screw driver to detect a tiny crack in a brick wall. The crystal lattice assists in observing this narrow resonance in two ways: (1) the trapped deuteron ion in the lattice well is sitting on a discrete energy level with very narrow width also; (2) the periodical structure of the lattice well creates an energy band for the trapped deuteron ions. Then, we have a bunch of needles to detect the single tiny crack on the brick wall. The number of the energy levels (needles) in this band is determined by the grain size,  $L$  (i.e. the size of the periodical structure, or the coherent length), and the size of the primitive cell in the palladium lattice,  $\delta$  (i.e. the size of the PdD molecule). When  $\delta \approx 3 \text{ \AA}$ ,  $L \approx 60 \mu$ , we have roughly  $(L/\delta)^3 \approx 10^{16}$  energy levels inside a deuteron energy band. On the other hand the deuteron energy band width,  $\Gamma_B$ , is determined by the size of the primitive cell as:

$$\Gamma_B \leq \frac{\hbar^2}{2m} \left( \frac{1}{\delta} \right)^2 \approx 10^{-3} \text{ eV} \quad (6)$$

Thus, the energy difference between each neighboring energy level inside the band is about  $10^{-19}$  eV. Hence, if the whole band is occupied by the deuterons; then, the whole population has the chance to be in resonance penetration of Coulomb barrier, as long as the energy band is adjusted to a level in resonance with the nuclear energy level. When  $(L/\delta)^3 \ll 10^{16}$ , we have much less chance to have resonance penetration of the Coulomb barrier due to the difficulty in matching the narrow nuclear energy level with the lattice energy level.

Now the question is: how can we populate the deuterons into this energy band? We need the Bose-Einstein condensation. Experiment has shown that hydrogen solved in palladium acts like an ion,<sup>[13]</sup> so deuteron should act like a boson. If the deuterons are totally free-moving particles like a gas inside the palladium; then, the critical density for Bose-Einstein condensation is about<sup>[14]</sup>

$$n_c = 2.612 \left( \frac{mk_B T}{2\pi\hbar^2} \right)^{3/2} \approx 8.5 \times 10^{24} \text{ cm}^{-3} \quad (7)$$

It is much higher than the maximum possible deuteron density inside the palladium ( $\approx 6.8 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$ ). However, the experiment has also shown that the hydrogen solved in palladium is not a free-moving gas. In order to explain the anomalous diffusion behavior of the hydrogen in the palladium, we must assume that there is a component of trapped hydrogen ions (localized).<sup>[15]</sup> If we assume an energy spectrum as that in Fig. 1,

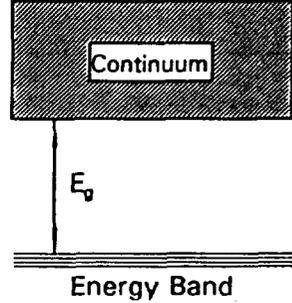


Fig.1 Energy Band Structure in Palladium Deuteride lattice

then the critical density for Bose-Einstein condensation would be

$$n_{c_g} = n_c \exp\left(-\frac{E_g}{k_B T}\right) \quad (8)$$

Using  $n_{c_g} \approx 6.8 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$  (corresponding to critical loading ratio  $\approx 1$ ),  $T=300 \text{ K}$ , we have

$$E_g = -k_B T \log\left(\frac{n_{c_g}}{n_c}\right) \approx 125 \text{ meV} \quad (9)$$

this number is very close to the activation energy for hydrogen in palladium.<sup>[15]</sup>

In fact this condensation model gives a good reason for the critical loading ratio. If the deuteron density is lower than this critical density  $n_{c_g}$ , then, there will be no enough population in the low lying energy band, and less chance for resonance penetration.

## 5. Nuclear Surface Absorption and $0^+ \rightarrow 0^+$ Forbidden Transition

The low energy beam-target experiments have established a fact that the strong interaction will annihilate the penetrating deuteron wave after several reverberations. When one assumes the reaction rate

$$\Lambda = A |\Psi(0)|^2 \quad (10)$$

low energy experimental data show that  $A = 1.5 \times 10^{-16} \text{ cm}^3 \text{ sec}^{-1}$ .<sup>[16]</sup> Considering that the volume of the deuteron-deuteron nuclear interaction is the order of  $10^{-39} \text{ cm}^3$ , we know that the life-time of the deuteron-deuteron strong interacting system is the order of  $10^{-23} \text{ sec}$ , i.e. the order of the reverberation time. Then, one may ask the reason why the built-up wave function in the resonance case is not annihilated by this strong interaction .

In fact, the strong absorption in the nuclear well is concentrated on the surface region as suggested by the nuclear optical model.<sup>[17]</sup> The reaction "constant",  $\lambda$ , is not a constant inside the nuclear well; hence, the reaction rate,  $\Lambda$ , should be

$$\Lambda = \int \lambda(r) |\Psi(r)|^2 d^3\vec{r} = \int \lambda_v(r) |\Psi_v(r)|^2 d^3\vec{r} + \int \lambda_s(r) |\Psi_s(r)|^2 d^3\vec{r} \quad (11)$$

Here, the subscripts, V and S, denote the volume and surface, respectively.  $\lambda_v(r)$  is much smaller than  $\lambda_s(r)$  by a factor of  $\theta^{-1}$ . When there is no resonance,  $|\Psi_v(r)| \approx |\Psi_s(r)|$ ; then, the reaction happens mainly in the surface region of the nuclear well, and the life-time is the order of the reverberation time. When the energy reaches the resonance level, the wave function,  $\Psi_v(r)$ , builds up due to the constructive interference between the penetrating wave and the reverberating wave.  $|\Psi_v(r)| \approx \theta |\Psi_s(r)| \gg |\Psi_s(r)|$ . Hence,

$$\int \lambda_v(r) |\Psi_v(r)|^2 d^3\vec{r} \approx \int \frac{1}{\theta} \lambda_s(r) |\Psi_s(r)|^2 d^3\vec{r} \gg \int \lambda_s(r) |\Psi_s(r)|^2 d^3\vec{r} \quad (12)$$

The life-time of the state is determined by the core part of the wave function, and is greater than the reverberation time by a factor of  $\theta$ .

In other words, the strong interaction annihilates only the deuteron wave near the nuclear surface. The deuteron wave function can still be built up inside the core of the nuclear well where the absorption due to strong interaction is weak. Physically, the absorption (i.e. deuteron loses its identity) only happens in the region where the nuclear force (the derivative of the nuclear potential) is large. Inside the nuclear core, although the nuclear well is deep, the nuclear force is weak there. So the deuteron wave can survive inside the core of the nuclear well.

In contrast to the short range of the nuclear force, the electromagnetic interaction is a kind of long range force. One may ask the reason why the electromagnetic force does not annihilate the long life-time state. This is due to the symmetry of the system. The symmetry of the wave function of the d+d system is determined by their orbital motion and their spin motion. At the low incident energy, only the S-wave (orbital angular momentum  $l = 0$ ) is dominant inside the core of the nuclear well. So the symmetry for the orbital motion is symmetric about the exchange of the two deuterons. Then, the spin motion part of the wave function should be symmetric also in order to keep the symmetry of the total wave function which is necessary for a boson-boson indistinguishable particle system. The spin for each deuteron is 1, the resultant angular momentum may be 0, 1, or 2. Since the state of resultant spin 1 is anti-symmetric about the exchange of the two deuterons, it is not an allowable state. The resultant spin should be 0 or 2.<sup>[18]</sup> Consequently, the possible total angular momentum and parity for the d+d system is  $0^+$ , or  $2^+$ . If the resonance state takes the  $0^+$ ; then, it should be stable against the electromagnetic interaction. Because the ground state for d+d system is  $0^+$  (helium-4), and the spin for photon (the electromagnetic quantum) is 1,

it is forbidden to have a  $0^+ \rightarrow 0^+$  electromagnetic transition due to the conservation of the angular momentum.

What we have to figure out is the mechanism through which the excited d+d system transfers the energy to the lattice system in a slow time scale.

## **6. Conclusion: Thunder without Lightning is OK**

Based on above-mentioned discussion, we have seen that the long life-time nuclear active state may be created after the resonance penetration of Coulomb barrier in the d+d system in terms of the lattice confined deuterons. This is a resonance state which cannot be observed in a low energy beam-target experiment. This resonance state will not emit strong nuclear radiation (neutron, triton, or  $\gamma$  radiation). This is just the answer to Professor J.Huizenga's challenge of three miracles. Only the chemists have a better chance to discover this nuclear active state in terms of calorimeter, because there is no strong nuclear radiation.

Although it is a long life-time slow reaction, it is still a practically useful energy source. Even if only one thousandth of the deuterons inside the palladium are involved in this state, the "excess power" is of the order of 1 kW per cubic centimeter of the palladium. This is about the same as that in a fuel rod of a fast fission breeder reactor.

In these two meanings, we say that thunder without lightning is O.K. This theory predicts that if we could produce the palladium with greater grain size and greater activation energy, it should be easier to reproduce the "excess heat" experiment.

## **Acknowledgments**

This work is under the project of the State Commission of Science & Technology, and the Natural Science Foundation of China. Many thanks to Mr. Karl Chang, the co-founder of the VeriFone Inc., for his generous support, and to Professors D.Yount, G.Andermann, B.Liebert, and Dr. B.Liaw for their hospitality during author's visit to the Univ. of Hawaii. Professor M.Fleischmann's personal contribution is critical for this work to be presented at ICCF-5.

## **List of Symbols**

a=size of the nuclear well, cm	m=mass of deuteron, g
A=experimental bulk reaction constant, $\text{cm}^3\text{sec}^{-1}$	$n_c$ =critical density for Bose condensation of free-moving particles, $\text{cm}^{-3}$
b=classical turning point of Coulomb barrier, cm	$n_{c_g}$ = critical density for Bose condensation of particles with energy gap in spectrum, $\text{cm}^{-3}$
d=deuteron	r =radial coordinate, cm
E=total energy of relative motion, erg.	T=temperature, K
$\hbar$ =Planck constant divided by $2\pi$ , erg-sec	U=potential energy, erg
$k$ , $k'$ and $K$ =wave number, its imaginary and real part, $\text{cm}^{-1}$	ImU=imaginary part of the potential energy, erg
$k_B$ =Boltzmann constant, erg·K	$\Gamma$ = width of energy level, erg
L=grain size in crystal, cm	

$\Gamma_B$ =width of energy band, erg  
 $\delta$ =size of the primitive cell of a crystal, cm  
 $\lambda$ =reaction constant, sec<sup>-1</sup>  
 $\lambda_c$ =reaction constant in core region of the nuclear well, sec<sup>-1</sup>  
 $\lambda_s$ =reaction constant in surface region of the nuclear well, sec<sup>-1</sup>  
 $\Lambda$ =reaction rate, sec<sup>-1</sup>

$\theta$ =square root of the reciprocal of Gamow factor  
 $\tau$ =life-time of an energy level, sec  
 $\tau_{rh}$ =life-time of the resonance state releasing "excess heat"  
 $\Psi$ =wave function, cm<sup>-3/2</sup>

## References

1. J.R. Huizenga, "Cold Fusion: The Scientific Fiasco of the Century", p.112, University of Rochester Press (1992).
2. G.Gamow, "Zur Quantentheorie des Atomkernes." *Zeitschrift fur Physik*, 51, 204 (1928).
3. S.Pons & M.Fleischmann, "Heat after death", *Proceedings: Fourth International Conference on Cold Fusion*, December 6-9,1993, Lahaina, USA, Vol.2, p.8-1(1994).
4. M.C.H.McKubre, et al., "Loading, Calorimetry, and Nuclear Investigation of the D/Pd System", *Proceedings: Fourth International Conference on Cold Fusion*, December 6-9,1993, Lahaina, USA, Vol.1, p.5-26(1994).
5. J.P.Biberian, "Excess Heat Measurement in AlLaO<sub>3</sub> Doped with Deuterium", ICCF-5, paper No.205(1995).
6. E.Storms, "A Critical Overview of Cold Fusion", ICCF-5, paper No.101(1995).
7. M.Eisner, "The Serendipitous Design and Execution of an Early Experiment which Confirmed Heat in the Fleischmann-Pons Effect", ICCF-5, paper No.212(1995).
8. X.Z.Li, "Tunneling the Coulomb Barrier via Lattice Confined Ions", submitted to *Physics Letters A*,(1995).
9. X.Z.Li, "Revisit to Gamow Factor", ICCF-5, paper No.403,(preprint,1995).
10. S.E.Koonin, and M.Nauenberg, "Calculated Fusion Rates in Isotopic Hydrogen Molecules." *Nature*, 339, 690(1989).
11. Ya. B. Zel'dovich, S.S.Gershtein, "Nuclear Reactions in Cold Hydrogen, I. Mesonic Catalysis", *Soviet Phys. Usp.* 3, 593 (1961).
12. F.E.Cecil, and G.M.Hale, "Measurement of d-d and d-<sup>6</sup>Li Nuclear Reactions at Very Low Energies." in the "The Science of Cold Fusion." Edited by T.Bressani, E.Del Giudice and G.Preparata, SIF, Bologna, p.271 (1991).
13. A.H.Verbruggen, et al., *Phys. Rev. Lett.* 52, 1625 (1984).
14. C.Kittel, and H.Kroemer, "Thermal Physics", 2-nd ed., p.281, Freeman, New York (1980).
15. Y.Fukai, "The Metal-Hydrogen System", p.212, Springer Verlag, Berlin (1993).
16. F.W.Fowler, G.R.Caughlan, & B.A. Zimmerman, *A. Rev. Astr. Astrophys.* 5, 525-570 (1967).
17. H.Feshbach, "Theoretical Nuclear Physics", Wiley & Sons, Inc., Boston, p.488(1992)
18. D.M.Brink, and G.R.Satchler, "Angular Momentum", 3-rd ed., p.35, Oxford Science Publications (1993).

서 지 정 보 양 식

수행기관보고서번호	위탁기관 보고서번호	표준보고서번호	INIS주제 코드
KAERI/RR-1602/95			
제목 / 부제	상은 핵융합		
연구책임자 및 부서명	서 석 용	핵융합분야	
연 구 자 및 부서명			
발 행 지	대전	발행기관	한국원자력연구소
발행일	1996. 1.		
페이지	p.	도표	유(O), 무( )
크 기	Cm		
참고사항			
비밀여부	공개( ), 대외비( ), _ _급비밀	보고서종류	연구보고서
연구위탁기관		계약번호	
초록 (300단어 내외)			
<p>기술 추적과 분석 및 재현 가능성이 높은 연구에 관한 집중적인 문헌조사.                  Condensed matter에서의 Excitonic Process의 상온 핵융합에 응용 가능성을 연구.                  연구도중 지시에 의하여 연구 중단함.</p>			
주제명 키워드 (10단어 내외)	Code Fusion, Excitonic Process		

## BIBLIOGRAPHIC INFORMATION SHEET

Performing Org. Report No.	Sponsoring org. Report No.	Standing Report No.	INIS Subject Code
KAERI/RR-1602/95			
Title/Subtitle	Code Fusion		
Project Manager and Dept	Seokryong Suh	Fusion Lab.	
Researcher and Dept			
Pub. place	Korea	Pub. Org	KAERI
			Pub. DATE
			1996. 1.
Page	p.	III. and Tab	Yes(○), No( )
			Size
			Cm
Note			
Classified	Open( ), Outside( ), _ _ Class	Report Type	Research Report
Sponsoring Org.		Contract No.	
Abstract (About 300word)			
<p>Nearly every technical informations are chased in the world.  All of them are reviewed and analyzed. Some of them are chosen  to study further more to review every related documents.  And a probable suggestion about the excitonic process in deuteron  absorbed condensed matter is proposed a way to cold fusion.</p>			
Subject Keywords (About 10 words)	cold fusion, excitonic process		