

GOVP1199103910

제 1 차 년 도
연 차 보 고 서

KSRI-91-72-IR

상온 핵융합 이론연구
(제 1 차 년 도)

Study on the Cold Fusion Theory

연 구 기 관
재단법인 한국표준연구소

과 학 기 술 처

BIBLIOGRAPHIC DATA SHEET		1. 관리번호	2. 수행부서 방사선 연구실	3. 발행일 1991. 4
4. 제목/부제 상온 핵융합 이론연구 (I)			7. 주제분야 2008	
5. 저자(공저자) 이광필, 김원식, 최길웅		8. 수행기관 보고서번호 KSRI-91-72-IR		
6. 수행기관(KSRI 이외의 공동 혹은 위촉연구기관)		9. 계약번호		
		10. 자료내역		
11. 위탁기관 과학기술처				
12. 보충사항				
13. 초록(주요 참고문헌이나 관련문헌이 있을 경우 여기에 명시한다)				
<p>최근 관심을 모으고 있는 전기화학적 상온핵융합 반응기구에 대한 이론적 고찰과 상온핵융합의 가능성을 검토하기 위한 무온 촉매 핵융합의 충돌과정 중에서 고전적 binary-encounter 이론을 써서 기체 및 액체상태의 H₂, D₂, T₂ 속에서 무온의 저지능과 감속시간을 계산하였으며 양자론적으로 계산된 값과 잘 일치 하였다.</p>				
14. 키워드(6~12개)				
전기화학적 상온핵융합, 무온촉매핵융합, 고전적 binary-encounter 이론, 저지능, 감속시간, 양자론				
15. 배포구분 01		16. 해제기간		17. 면수 41
				18. 가격

BIBLIOGRAPHIC DATA SHEET	1. REPORT NO.	2. PERFORMING LAB. Radiation Lab.	3. REPORT DATE 1991. 4
4. TITLE/SUBTITLE Theoretical Study on the Cold Fusion (I)			7. SUBJECT CATEGORY 2008
5. AUTHOR(S) Kwang-Pill Lee, Wuon-shik Kim, Kil-oung Choi		8. PERFORMING ORGANIZATION REPORT NO. KSRI-91-72-IR	
6. PERFORMING ORGANIZATION NAME		9. CONTRACT OR GRANT NO.	
		10. TYPE OF REPORT	
11. SPONSORING ORGANIZATION Ministry of Science and Technology			
12. SUPPLEMENTARY NOTES			
13. ABSTRACT This report describes the theoretical considerations on the electrochemically induced nuclear fusion and the muon catalyzed fusion. The stopping power and the slowing down time for the negative muon in the liquid and gas state of H ₂ , D ₂ and T ₂ were calculated using the classical binary-encounter theory. These values are compared to the values based on the quantum theory, and result in good agreements.			
14. KEYWORDS electrochemically induced nuclear fusion, muon catalyzed fusion, stopping power, slowing down time, classical binary-encounter theory, quantum theory			
15. CLASSIFICATION 01	16. SCHEDULE OF DECLASSIFICATION	17. NO. OF PAGES 41	
		18. PRICE	

제 출 문

과학기술처장관 귀하

본 보고서를 상온 핵융합 이론연구의 제 1 차년도 연차보고서로 제출합니다

1991년 4월

주관연구기관명 : 한국표준연구소

총괄연구책임자 : 이 광 필

연구 원 : 김 원 식

최 기 우

, = 0

여 백

요 약 문

I. 제 목

상온 핵융합 이론연구

II. 연구의 목적 및 중요성

핵융합은 수십년간 인류의 꿈으로 중요시 되어왔다. 만약 핵융합이 실현된다면 무한정의 에너지를 전세계가 유용하게 사용할 수 있다. 그러나 기존핵융합은 거대한 장비, 어려운 실험조건 및 국제적 규모의 실험을 하여야하는 어려움이 따른다. 금년 연구목표는 최근의 관심을 모으고있는 전기화학적 상온 핵융합의 반응기구에 대한 이론적고찰과 상온핵융합의 가능성을 검토하기 위한 뮤온축매 핵융합에서의 충돌과정을 연구하는 것이다.

III. 연구의 내용 및 범위

본 연구의 제1차년도 수행내용과 범위는 다음과 같다.

- ° 전기화학적 핵융합의 가능성 검토
- ° 고전적 binary-encounter이론을 써서 중수소와 삼중수소 속에서의 뮤온의 충돌과정 계산.

IV. 연구의 결과 및 활용

본연구의 1차년도 결과는 아래와 같다.

- ° 전기화학적 핵융합 가능성의 이론적 고찰
- ° 기체와 액체상태의 H_2 , D_2 , T_2 속에서의 뮤온의 stopping power계산 (Fig.9,10)
- ° 기체와 액체상태의 H_2 , D_2 , T_2 속에서의 뮤온의 slowing down time 계산 (Fig.11,12)

상기결과는 뮤온의 sticking 확률계산과 뮤온축매 핵융합 반응을 계산에 활용될 예정이다.

여 백

SUMMARY

I. Title

Theoretical Study on the Cold Fusion

II. Objectives and Importance

Controlled nuclear fusion has been a dream for decades. If fusion power could be harnessed, unlimited energy would be available to the whole world. But controlled nuclear fusion demand massive equipment, difficult experimental conditions and experiment on the international scale. The objective of this project is to investigate the reaction mechanism of the cold fusion using an electrolytic cell and to calculate the collisional processes in the muon catalyzed fusion for the purpose of investigating the probability of the cold nuclear fusion.

III. Contents and Scope

The contents of this project include

- ° Investigation of the probabilities of electrochemically induced nuclear fusion.
- ° Calculation of the collisional processes involving a negative muon in the deuterium and tritium system using the classical binary-encounter theory.

IV. Results and Applications

In the first year of this report the following results have been attained.

- ° Theoretical consideration for the probabilities of the

electrochemically induced nuclear fusion.

- The stopping powers of muon in the H₂, D₂ and T₂ of gas and liquid states were calculated(Fig.9,10).
- The slowing down times of muon in the H₂, D₂ and T₂ of gas and liquid states were calculated(Fig.11,12).

These results are applicable to calculate the sticking probability of muon and the muon catalyzed fusion rate.

CONTENTS

Chapter 1. Introduction	1
Chapter 2. Nuclear Fusion	3
Section 1. Hot Fusion	3
Section 2. Cold Fusion	5
Chapter 3. Collision Theory in the Muon Catalyzed Fusion	17
Section 1. Muon	17
Section 2. Muon Catalyzed Fusion	18
Section 3. Calculation for the Stopping power and the Slowing down time of the Negative Muon by Collision Theory . . .	20
Chapter 4. Conclusion	31
References	33

여 백

목 차

제 1 장	서 론	1
제 2 장	핵융합	3
제 1 절	고온 핵융합	3
제 2 절	상온 핵융합	5
제 3 장	뮤온 상온 핵융합에서의 충돌이론	17
제 1 절	뮤온	17
제 2 절	뮤온 촉매 핵융합	18
제 3 절	충돌이론에 의한 MCF의 Stopping power와 Slowing down time 계산	20
제 4 장	결 론	31
참 고 문 헌		33

제 1 장 서 론

인류사와 더불어 에너지는 과학·경제 발전에 중추적 역할을 해왔으며, 그 의존도가 급증하고 있는 오늘날 화석류 에너지원의 고갈 및 그 사용에 따른 지구환경의 위협, 체르노빌 원전 사고로 인한 원자력 발전소의 방사선 안전성 위협과 부산물로서의 핵 폐기물 처리에서 비롯되는 환경오염 및 생태계의 위협, 설상가상으로 최근의 걸프전쟁으로 인한 석유에너지 의존의 불안정 등으로 무공해·무한정의 꿈의 에너지원인 핵융합은 온 인류의 당면과제로 대두되었다. 핵융합 반응에 적합한 조건으로는 약 1억도 이상의 고온에서 플라즈마의 고밀폐가 이루어져야 하는데 자장밀폐 및 관성밀폐의 기술을 이용한다.

따라서 핵융합 기술은 고온유지 및 플라즈마 응축등의 극한 기술과 신소재, 레이저, 초전도기술등의 첨단기술을 요하기 때문에 막대한 시설 투자가 요구되고 있다.

한편 종래와는 다른 실험을 분석하는 과정중에서 1950년대에 Alvarez는 액체 중수소상태에서 뮤온 축매 핵융합을 처음으로 관측하였으며, 고온 플라즈마 핵융합에 대칭하여 상온 핵융합 현상이라고 표현하였다. 뮤온 축매 핵융합은 뮤온의 생성과 뮤온축매로 인한 핵융합의 효율성이 경제적으로 이득이 없는 상태에서 대형가속기를 보유한 선진각국에서 연구를 계속하여 좋은 결과를 얻고 활발한 연구가 수행되고 있다.

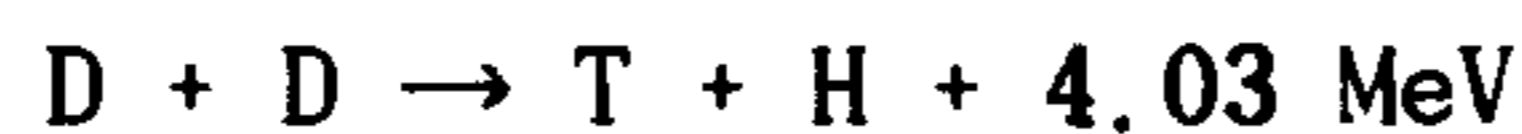
본연구는 상온 핵융합 이론의 2개년 연구계획중 1차년도에의 결과로서 제2장에는 고온 핵융합과 상온 핵융합에 대하여 제3장에서는 충돌이론에 의한 뮤온 축매 핵융합에서 negative 뮤온의 stopping power와 slowing down time을 계산하고 제4장은 그 결론이 된다.

여 백

제 2 장 핵 융 합

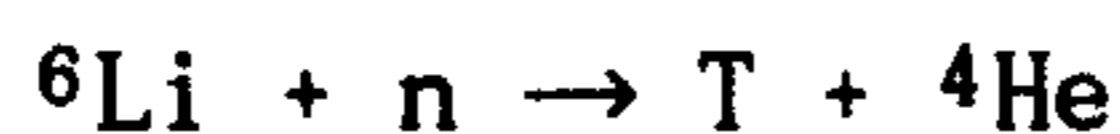
제 1 절 고온핵융합

핵융합 가능성이 처음 알려진 것은 1930년대말에 Bethe가 태양의 핵연소과정을 발표하면서 부터이다. 수소로부터 시작되는 복잡한 연속반응으로 가벼운 원자핵들이 결합하여 보다 무거운 원자핵이 생성되는데, 이때에 전보다 더 강하게 결합하기 때문에 여분의 에너지가 외계로 방출된다. 태양의 핵융합은 수소가 융합하여 헬륨을 만드는 과정이며 인공핵융합이 최초로 이용된 것은 1950년대의 수소폭탄 제조이다. 원자폭탄에 의하여 방출되는 막대한 에너지로 수소융합을 점화시키는 방식으로 수소폭탄이 개발되었는데, 폭탄의 폭발은 제어불가능한 연쇄반응으로서 엄청난 에너지 방출이 순간적으로 일어나 평화적 목적으로 전혀 사용할 수 없으므로, 핵융합 기술의 변천은 핵융합 반응의 계속적 유지와 이를 제어할 수 있는 장치 개발에 주력하고 있다. 지상에서 가장 효율이 좋다고 생각되는 핵융합 반응은



이다. 지구 위에는 물이 풍부하게 존재하며 H₂O속에는 D₂O가 0.017% 있으므로 이것에서 D를 꺼내 연료로 사용하면 거의 영구적으로 에너지원에는 부족이 없을 것이다.

가장 편리한 연료는 Li에 원자로에서 나오는 n를 조사해서 T를 만들고



이 T를 D와 조합해서 핵융합을 일으키면



의 다량의 에너지를 얻을 수 있다.

이같은 D, T를 사용한 핵융합 반응에서는 반응후의 생성물 중에서 T만이 방사능을 가지고 β붕괴를 하므로



핵분열을 이용하는 원자로가 핵분열 생성물 또는 Pu 등 종류가 많고 다량의 방사성 물질을 포함하는 것과 비교하면 핵융합 반응의 방사능 준위는 무시될 수 있다.

그런데 D와 T사이에 근접력의 강력인 핵력을 빌어 핵융합을 시키기 위해서는 이들 사이의 쿨롱 반발력을 이겨 근접시켜야 하므로 외부로부터 에너지를 가해서 D와 T를 가속시켜 둘이 충돌하도록 해주어야한다. 이 외부로부터 가해야하는 에너지는 대략 10 keV 정도인데 D를 전리해서 원자핵(d)만을 모아놓고 10 kV 이상의 전압을 걸어 T에 조사하면된다. 그런데 d가 T에 입사하면 T의 궤도전자와 충돌하여 에너지가 상실되므로 T도 전리 시켜야한다. 즉 D, T의 혼합기체를 가열하여 1.5×10^5 °C 정도로 하면 전자가 원자로부터 분리되며 기체는 전자 e와 양이온상태인 d, t의 혼합기체, 즉 플라즈마 상태가 되고 플라즈마의 온도가 1억°C쯤되면 이온의 운동은 맹렬하고 속도도 늘어나서 10 keV정도가 되고 핵이 서로 충돌하여 핵융합 반응이 일어나므로 핵융합연구는 이 플라즈마를 가두어 넣는 것과 초고온을 유지하는데 달려있다.

따라서 핵융합 반응로는 첫째로 연료가 점화되기까지 충분히 가열할 수 있어야하고, 둘째로는 연료의 연소가 안정적으로 계속 유지되어 실제 에너지의 초과 발생이 생기도록 해야한다. 이러한 조건으로 인해 반응로의 가장 중요한 핵심기술은 1억°C이상의 고온 플라즈마를 어떻게 효과적으로 취급할 수 있는가 하는 것이 문제인데, 현재 크게 나누어 자장제어방식과 관성제어방식의 융합로가 개발되고 있다. 자장제어방식은 플라즈마 즉, 전자와 이온들이 자력선에 의해 적당히 조절되어 효과적인 상호충돌을 유도하는 원리인데 최근에 Tokamak가 개발되어 시험가동에서 입력에너지와 출력에너지가 상쇄될 정도의 획기적인 결과를 얻어냄으로서 고온 핵융합의 실용화에 한발 다가선 것으로 평가되고 있다. 그러나 Tokamak은 장치가 비대하여 실용화된다고 하더라도 경제성이 문제가 되며 기술적으로는 자력손실을 방지하기 위해 별도의 코일을 통한 맥동전류를 사용해야하므로 실제 응용면에서는 여러가지 문제점이 야기될

것으로 보고 있다. 한편 자장에 의해 응축된 플라즈마의 밀도는 매우 낮아서 대기압의 10^{-3} 정도에 불과한데 플라즈마의 밀도를 증가시키기 위해 핵융합 연료를 주입한 작은 펠렛을 강력한 Photon이나 하전입자 비임을 조사하여, 고밀도로 응축시키는 관성제어방식이 최근에 개발되었는데 이러한 방법으로 레이저 핵융합을 들수 있다. 그러나 레이저 핵융합도 실용화에 앞서 몇가지 문제점이 있는데 핵융합이 연속적으로 일어나기 위하여 펠렛의 온도와 밀도를 충분히 올릴 수 있는지의 여부와 이 목적에 맞는 레이저의 개발이 과연 가능한가 하는점과 펠렛의 제조에 따른 경제성등이 문제시 되고 있다.

제 2 절 상온핵융합

1. 상온 핵융합 현상

1989년 3월 미국 유타대학의 S. Pons 및 M. Hawkins와 영국의 사우스햄턴대학의 M. Fleischmann이 “전기화학적으로 유도된 중수소의 핵융합”을 논문으로 발표한 상온 핵융합에 관한 연구가 전세계적으로 큰반응을 일으킨 바 있으며, 이는 현재 사회가 요구하고 있는 제3에너지의 발견 가능성과 무공해 및 무한정의 에너지 자원 해결등 인류에 미치는 영향이 실로 막대한 것이다(1). 기존의 핵융합은 1 억도 이상의 고온 플라즈마와 초강자장과 일정이상의 밀도유지등의 극한 환경이 요구되어 실용화에 많은 어려움이 따르나, 상온핵융합이 만약 사실이라면 상온에서 간단한 전기분해로서 핵융합을 실현시키는 획기적인 신 에너지원이 될 수 있을 것이다. 그 후에 전세계의 많은 연구실에서 이 현상을 재현하고자 실험을 계속하여, 재현 성공의 발표가 한동안 쏟아져 나왔었다. 그러나 이러한 실험결과에 대하여 원자력 및 핵융합 전문 주요 연구기관에서의 재현실험의 성공에 대한 발표는 거의 없었다. 이론적인 면에서도 핵물리학자들은 핵반응이 상온에서 일어날 확률은 거의 없으므로 이 현상은 미지의 화학반응으로 일축하였으며, 반면에 일부 화학자들은 과잉열의 발생은 핵반응에 의한 것이라고 주장하였다. 국내에서도 추가실험등을 통해 재현실험

성공의 발표가 있었으나, 정밀 측정결과 긍정적인 실험결과를 얻지 못하고 있는 실정이며 세계적으로도 상온 핵융합 가능성의 재현실험 성공과 이론적 접근 등에 혼돈을 거듭하고 있는 실정이다.

현재 상온 핵융합은 재현성의 문제와 이하의 4개 문제점이 대두되고 있다.

- 가. 상온에 의한 중수소 핵융합은 이론적으로 불가능하다.
- 나. 과잉열은 핵융합을 증거로서 검출되고 있는 중성자의 양에서 예상되는 것보다 10^{12} 배 이상 크다.
- 다. 중성자의 에너지 판별이 어렵다.
- 라. 삼중수소 발생이 중성자 보다 10^8 배 정도 많다.

이러한 문제점을 규명하기 위한 실험 및 이론적 연구가 계속되고 있으며 여기에서는 상온핵융합의 가능성 및 이론에 관해서 간단히 논하여 보고자 한다.

전기화학적 상온 핵융합은 기본적으로는 중수(D_2O)의 전기분해라는 공통점이 있고 그 전기분해 cell은 Fig.1에 나타냈다.

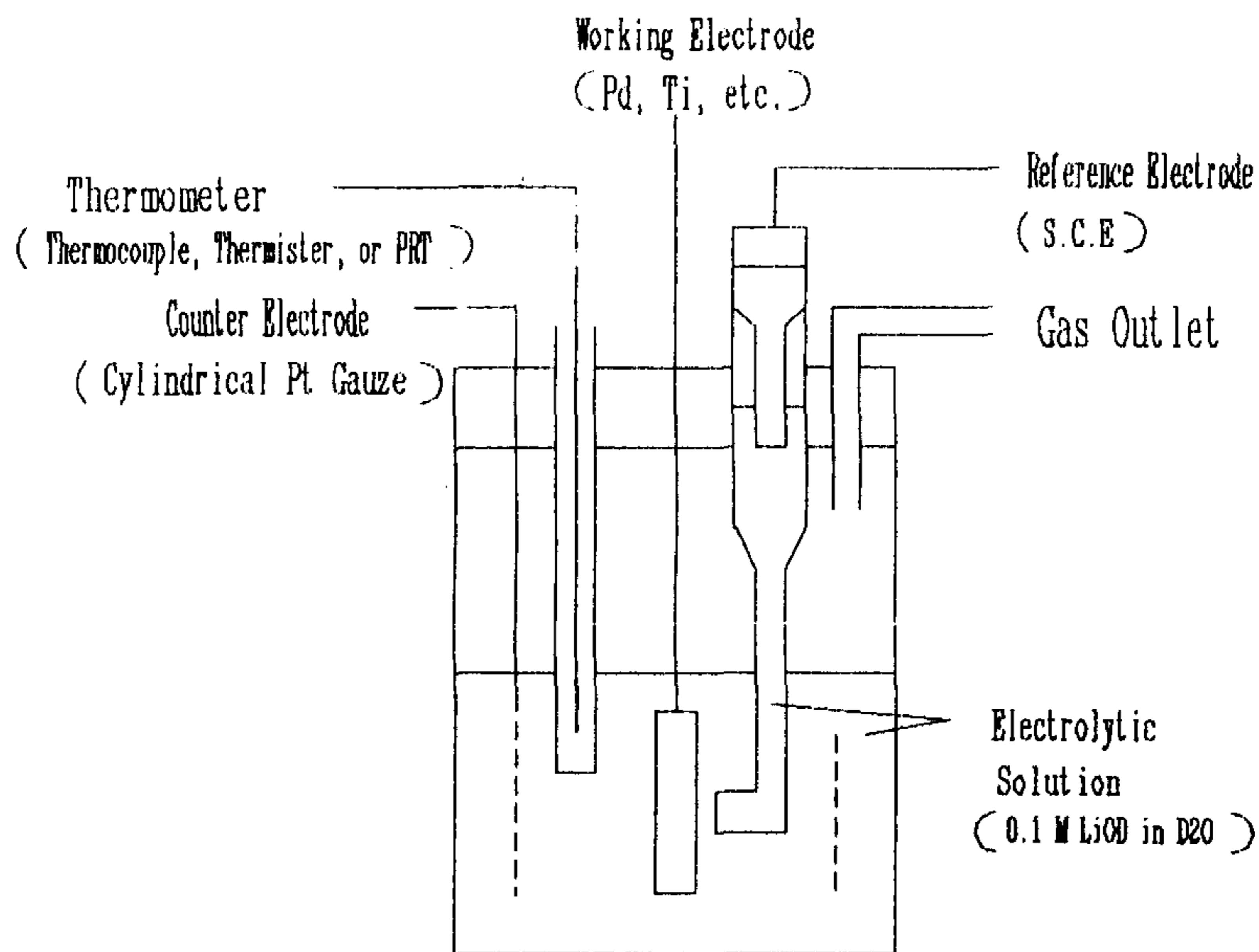
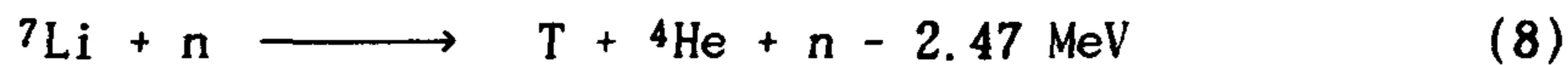
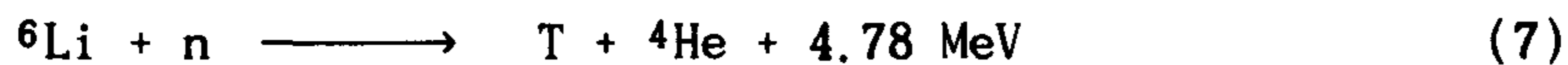
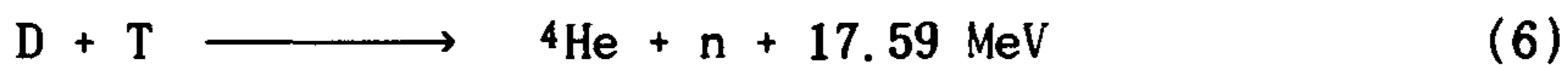
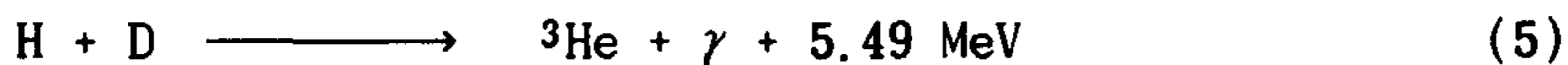
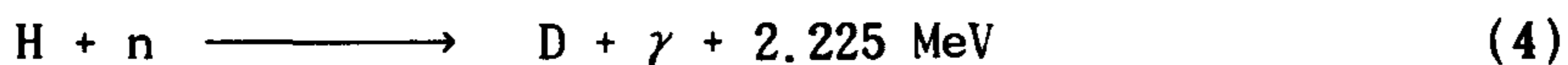
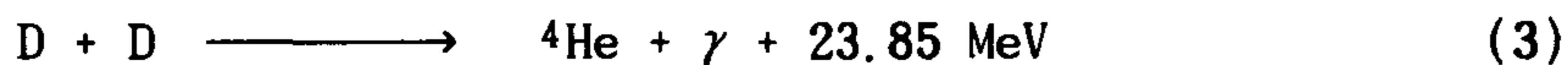
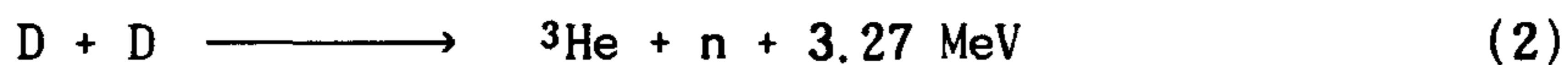


Fig. 1. Electrochemical Cell.

중수에는 LiOD 등의 금속염을 전해질로서 가하여, 산소(O₂)가 발생하는 양극 측에는 백금(Pt) 또는 금(Au)을, 음극측에는 수소를 잘 흡수하는 팔라듐(Pd) 또는 티타늄(Ti)을 사용하는데 이 음극의 수소저장 금속은 그 체적의 1000배 이상의 1기압의 수소가스를 흡수하고 흡수된 금속내의 수소원자의 밀도는 고체수소보다 더욱 높은 밀도가 된다.

그 결과 수소흡수에 따라 발열반응과 고체상태에 변형이 일어나고 이때 전기분해를 일으키면 전기입력의 10배 이상의 과잉열이 발생되고, 음극 금속내에 고밀도로 저장된 중수소가 핵융합(D-D반응)을 일으키면 다음과 같은 종류의 반응이 생기게 된다. Pons와 Fleischmann이 제안한 0.1M LiOD 용액의 전기분해 방식에 의한 상온 핵융합이 가능한 반응식은 다음과 같다.



위 반응중 상온 핵융합에 관련된 주반응은 (1) - (4) 반응이며, (5) - (8) 반응은 주반응에서 생성된 중성자와 양성자등이 주위 부산물과의 반응을 나타내며 이러한 반응들은 실제로 상온 핵융합 검증 실험에 있어서 삼중수소의 다량 생성의 원인이 될수 있다. 반응 (2)에서는 핵융합의 산물로 중성자를 검출할 수 있는데 중성자의 반감기는 14.9분 정도로서 방출된 중성자는 감속후 양성자 및 전자로 붕괴(2)되므로 중성자는 핵반응과 동시에 계측되어야 한다.

여기에서 다시 중성자가 수소와 반응하여 (n, γ) 반응을 일으킬 가능성도 제시하였다. (반응 (4)). 반응 (6)에서는 삼중수소 (T) 한개당 약 9×10^{-5} 의 비율로 제2차 중성자가 생겨난다. 그리고 삼중수소는 12.3년의 반감기를 가지고 Fig.2와 같이 ^3He 및 β 입자로 붕괴한다. 또한 반응 (1) 에서 방출되는 양성자와 중수소핵이 충돌하여 (5)가 진행된다. 반응 (3)에서는 높은 에너지의 감마선과 ^4He 을 검출할 수 있으나 반응 (1), (2)에 비해 일어날 확률이 $\sim 10^{-7}$ 배 정도 낮다.

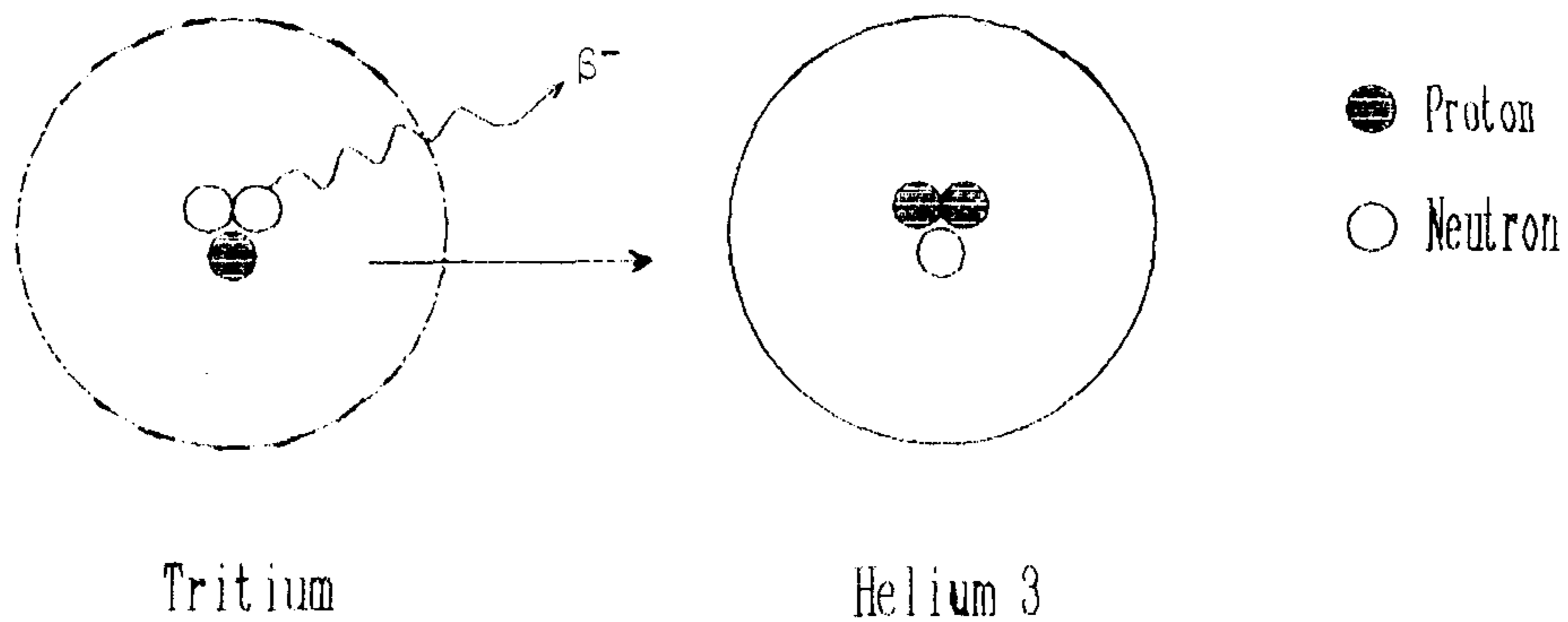


Fig. 2. Tritium decays by emitting a beta - ray and transmuting into Helium 3.

이상과 같은 복잡한 상온 핵융합을 규명하기 위해서는 다음과 같은 현상을 검증할 필요가 있다.

- 가. 중성자 (2.45 MeV)
- 나. ^3He (0.82 MeV)
- 다. 삼중수소 (1.01 MeV)
- 라. 양성자 (3.02 MeV)
- 마. 열
- 바. 반응을 일으키는 현상에 따른 정보 (전장, 자장, 하전입자, 빛 등)

이러한 증거는 상온 핵융합 연구의 제 1단계로 이것을 실험적으로 검출함으로써 상온 핵융합을 증명할 수 있으며 이러한 측정에는 Fig.3와 같이 전기 화학 반응추적, 고정밀방사능 측정, 정밀열량측정, 극미량 질량분석 등을 수행하여야 하지만 현단계에서 공히 재현성에 문제점을 가지고 있기 때문에 고정밀측정을 위한 연구를 계속하고 있는 실정이다.

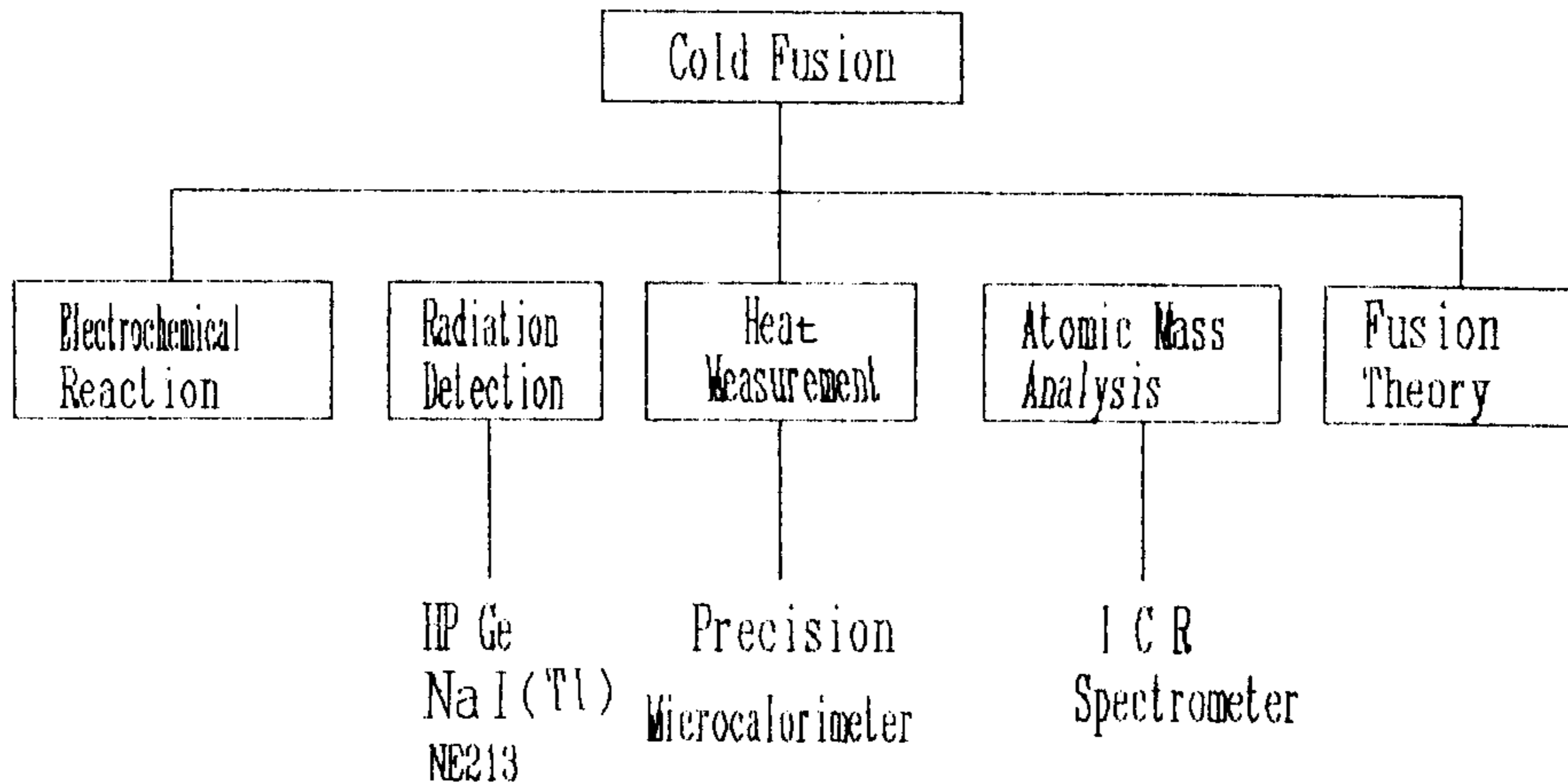


Fig. 3. Schematic diagram of cold fusion research.

2. 상온 핵융합의 반응기구

수소의 동위원소의 원자핵은 양성자를 1개씩 가지고 있으며 원자간에는 식 (9)와 같이 핵간거리의 제곱에 반비례하는 정전기적 쿨롱 반발력이 작용한다.

$$U = \frac{e^2}{4\pi r^2} \quad (9)$$

여기에서 4π 는 상수, r 는 핵간거리, e 는 단위 전하량이다. 원자핵간의 결합되는 핵력 범위에 존재하기 위해서는 상호 $5 \times 10^{-15}\text{m}$ 정도까지 접근해야 한다. 이때문에 300 keV 정도의 높은 반발력 장벽을 넘어야 한다. (Fig.4A)

이 반발력의 장벽을 넘기 위해서는 300 kV의 전위차로 원자핵을 가속시키

든지 또는 수 10억도의 고온 수소 플라즈마를 발생시켜야 할 필요가 있다. 그러나 양자역학의 세계에서 원자는 입자와 파동의 2중성을 나타내므로 장벽의 내부에도 존재할 확률을 가지고 있기 때문에 이 양자역학적 tunnel효과가 상온 핵융합의 중요한 역할을 할 것으로 기대되고 그 이론적 연구가 집중되고 있다.(Fig. 4B)

양자역학적 tunnel효과는 일본의 Esaki가 전자의 tunnel효과를 이용한 tunnel diode를 발명함으로써 노벨상을 수상한바 있고(2), 최근 Lee, Miyazaki 등은 극저온 상태인 고체수소 중에서의 수소원자의 tunnel효과를 실험적으로 증명하였다.(3),(4) 수소원자의 tunnel 현상은 전자보다 1840배 만큼 질량이 무거운 원자의 tunnel효과로서 상온 핵융합 연구 및 tunnel 효과의 응용분야와 고체수소내의 양자현상의 이론적 고찰이 요구되고 있다. 양자역학적 tunnel효과를 고려하면 높이 V_0 , 폭 L 을 가진 두꺼운 직사각형 potential 장벽($\frac{[2m(V_0-E)]^{1/2}}{\hbar} \cdot L \gg 1$)을 질량 m , 에너지 E 인 입자가 투과할 확률 T 는

$$T \approx 16\left(\frac{E}{V_0}\right) \left(1 - \frac{E}{V_0}\right) \exp\left\{-\frac{2}{\hbar} [2m(V_0-E)]^{1/2} \cdot L\right\} \quad (10)$$

이다.

그리고 Fig.5에 나타낸 바와 같이 고온 핵융합 이론에 따르면 원자핵이 반발력의 장벽이 얇은 곳을 투과하기 위하여 높은 에너지가 필요하지만, 상온 핵융합 이론에 따르면 양의 전하를 가진 원자 핵 주위에 퍼지는 전장이 음의 전장을 가진 전자에 의해 차폐되어 반발력의 장벽이 눌러져 줄어들게 되므로 낮은 에너지로도 투과가 가능하게 된다. 즉, 금속(Pd)내에 고밀도로 저장된 중수소 원자핵 주위의 전장을 전자가 어떻게 차폐할 것인가가 중요한 요인이 된다. 그리고 무거운 음의 하전 입자일수록 원자핵에 접근하기 쉽고 전장을 짧은 거리에서 차폐한다. 그리고 그 밀도가 높을수록 차폐효과가 크게 된다.

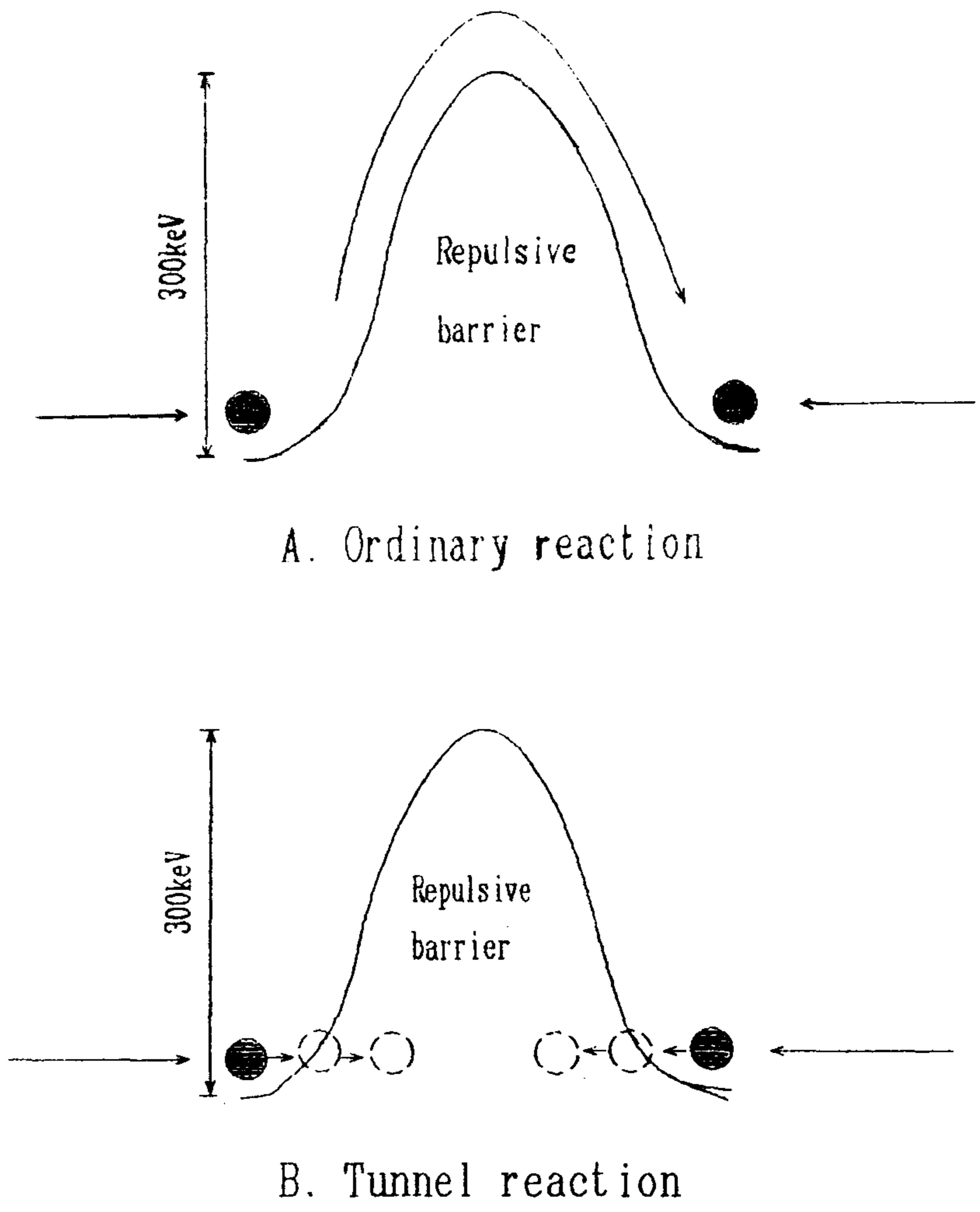


Fig. 4. Quantum tunneling suggests another way of bypassing the barrier - not climbing over it, but tunneling through it

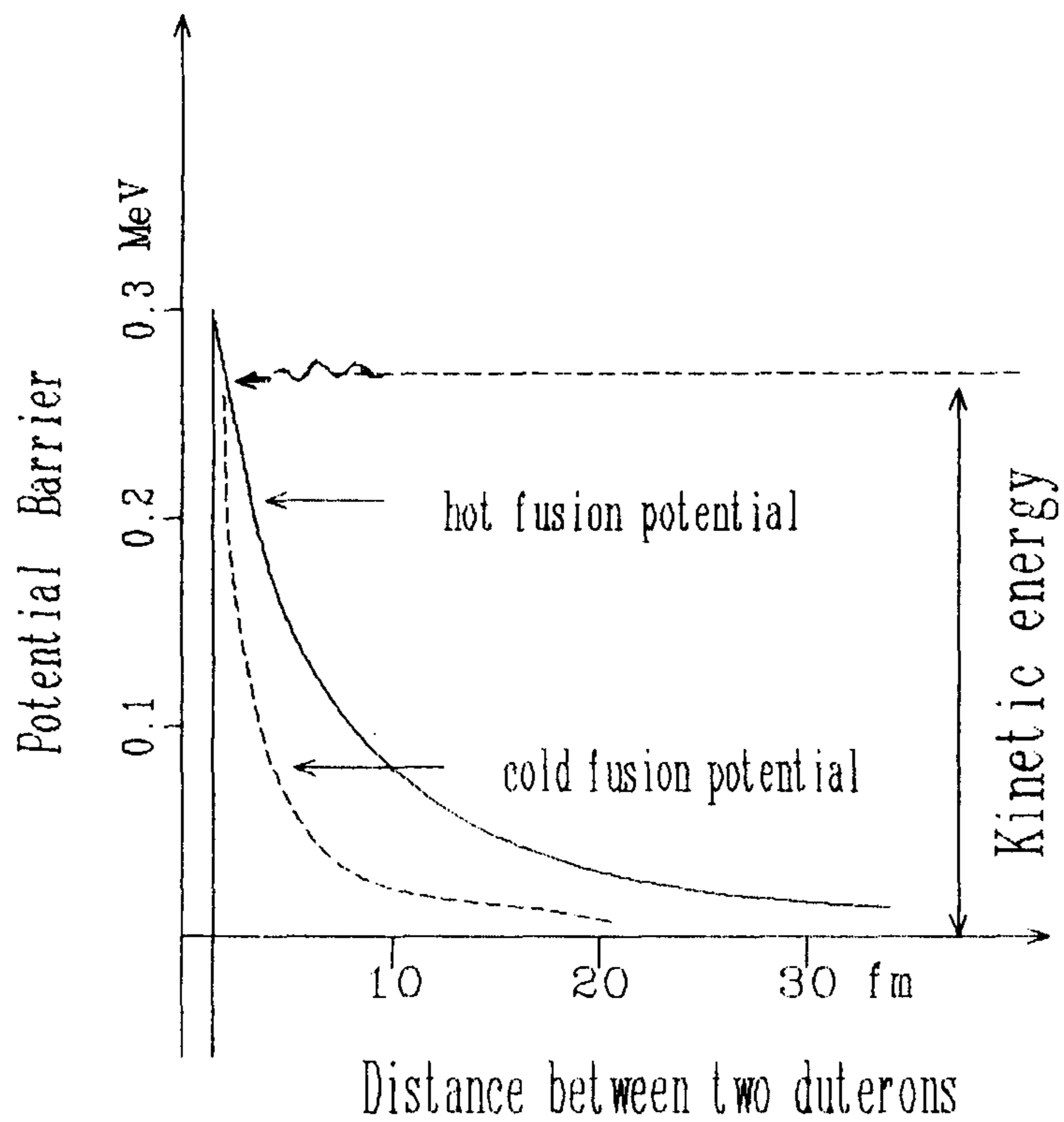


Fig. 5. Potential barrier in nuclear fusion.

고체중에서 전자는 주위로부터 여러가지 영향을 받으므로 그 유효질량 m_{eff} 는 자유전자의 m_e 와는 일치하지 않는다. Pons 등의 발열량과 Jones 등의 중성자수에 상당하는 D - D반응율을 유효질량의 변화로 설명하려면 Table 1과 같다.

Table 1 : Cold Fusion rates in isotope hydrogen molecules(Entries are \log_{10} of the rates s^{-1})(5).

	$m_{eff}/m_e = 1$	2	5	10
P + d	- 55.0	- 36.0	- 19.0	- 10.4
P + t	- 57.8	- 37.7	- 19.7	- 10.5
d + d	- 63.5	- 40.4	- 19.8	- 9.1
d + t	- 68.9	- 43.5	- 20.9	- 9.4

평형상태를 전제로 해서 반응율은 $10^{-30}/D-D/s$ 로 되고, m_{eff} 가 5내지 10배 증가하면 상온 핵융합이 일어날 확률도 증가할 것이다. 이러한 반응율을 얻기 위하여 상온 핵융합에서는 어떠한 주위환경과 금속격자내에서의 비평형 조건이 필요하다.

이 전기분해에 의한 상온 핵융합이 출현하기 이전에 독립적으로 뮤온(muon)을 촉매로한 상온 핵융합 반응이 연구되어 왔다. 1937년 우주선으로부터 Anderson등이 negative 뮤온을 발견한 이래 1957년 Alvarez는 액체상태(수소와 중수소)의 안개상자에서 뮤온에 의한 상온핵융합 현상을 최초로 관측하였다. 뮤온은 전자와 같은 성질을 가지고 있고 질량이 전자에 비해 약 207배 가량 큰 입자이다. 그러므로 Fig. 6에서와 같이 뮤온성 원자와 분자는 전자의 경우보다 207배나 더 가까운 곳에 원자핵이 위치하기 때문에 두개의 핵간의 강한 상호작용 거리에 더 근접할 수 있어 상온 핵융합의 가능성을 높여준다. 그러나 뮤온의 수명은 약 $2\mu s$ 이고, 뮤온의 생성은 가속기로 만들 필요성이 있어서 이 생성에 필요한 에너지와 핵융합에서 얻는 에너지의 차가 아직 경제성이 없는 단계이나 현재 미국, 일본, 캐나다 및 소련 등에서 연구가 계속되고 있다. 최근 실제 중수소를 흡장한 팔라듐에 뮤온법을 조사해본 결과 팔라듐안

에서는 별효과가 없는 것으로 나타났다.(6)

그외 현재 상온 핵융합의 주요 이론적 배경들은 다음과 같다.(7)

가. 고온플라즈마 반응

팔라듐이나 티타늄 내부에 고온 플라즈마가 형성되는 상태가 존재할 수 있는 모델을 가정한 것으로 crack에 의한 전장과 중수소 결합에 의한 열등에 의해서 상온핵융합이 일어날 가능성이 있다는 이론.

나. 매체 응축 반응(Fusion in Condensed Matter)

응축매체내에서 두개의 핵이 전자를 공유하여 이에따른 상호 공명현상과 유효질량의 변화로 핵융합 확률이 높아져 즉 tunneling 확률이 높아지는 등에 의한 상온 핵융합이 일어날 수 있다는 이론.

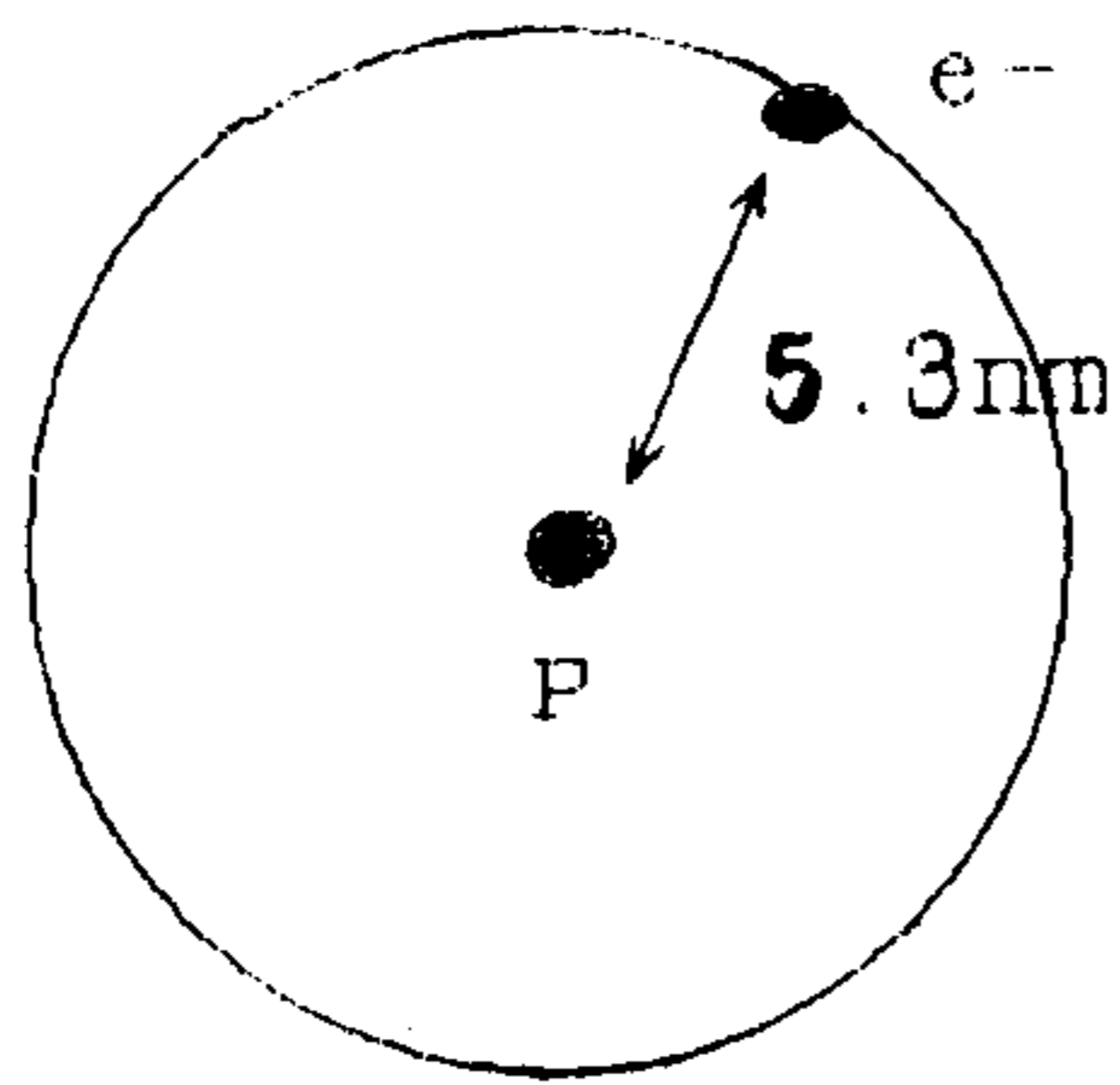
다. 연속 반응 기구(Chain Reaction Mechanism)

팔라듐 금속에 의한 연속반응기구(Chain Reaction Mechanism)는 중성자가 금속원자에 포획되면서 여러 종류의 팔라듐 동위원소와 감마선을 발생하여 중수소핵이 분열하고 다시 다른 중성자를 내놓아 연속반응이 일어나서 상온핵융합이 일어난다는 이론.

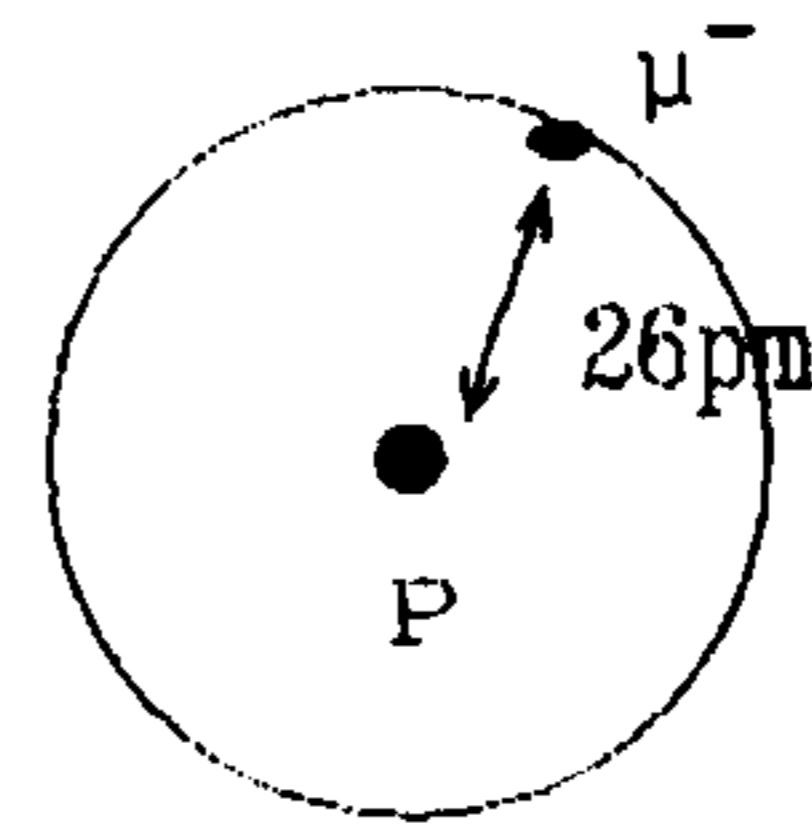
라. 표면 반응 모델(Surface Reaction Model)

전극의 표면에서 핵융합이 일어난다는 이론으로 표면에 중수소로 부터 D^+ 이온이 방출되어 강력한 전장에 의해 표면의 중수소와 충돌해서 양자 역학적 tunneling에 의해 상온 핵융합이 일어날 수 있다는 이론.

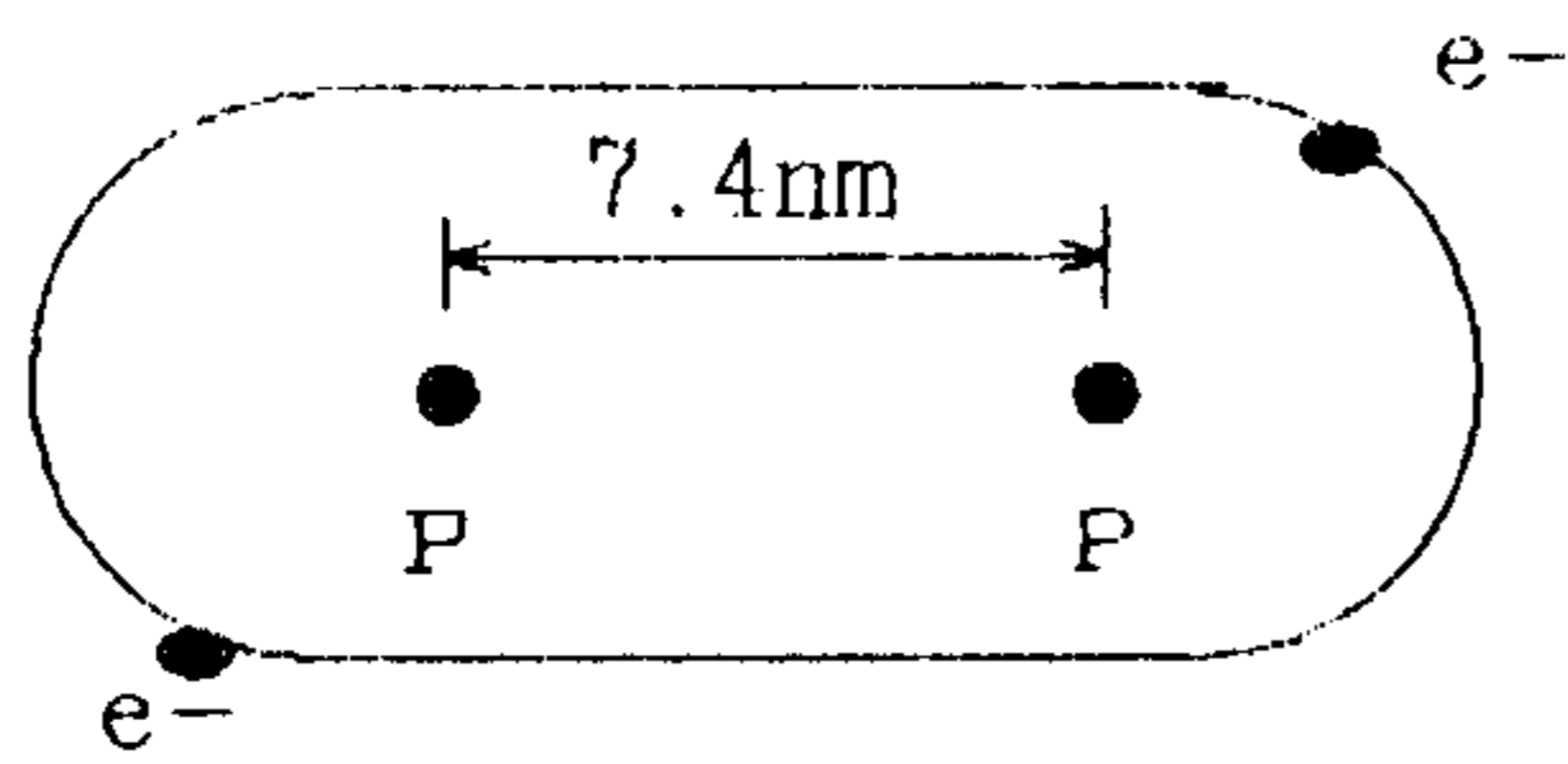
이외에도 많은 이론적인 연구가 되고 있지만 반면, 부정적인 이론도 많기 때문에 현재에도 이론적인 연구가 세계적으로 진행되고 있으며(8) 상온에서 핵간의 강한 반발장벽을 넘어 핵융합을 일으킬수 있는 반응기구의 검토와 긍정적인 실험결과를 비교·분석 할 수 있는 이론 연구가 요구된다.



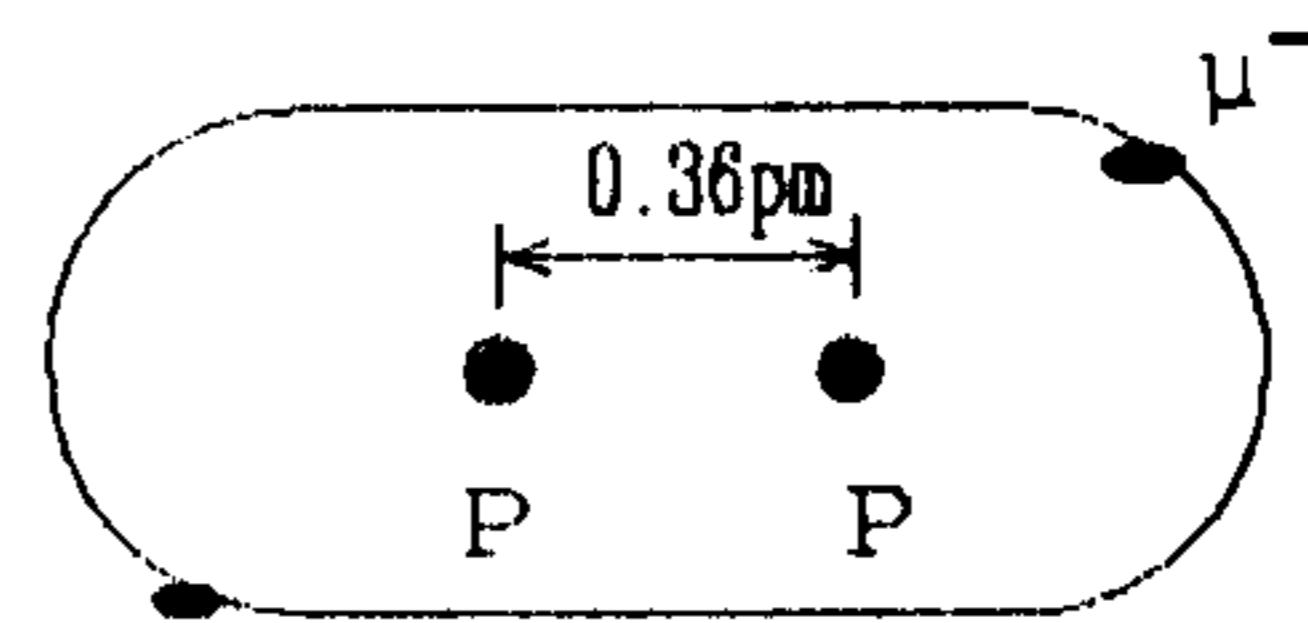
Hydrogen atom



Muonic hydrogen atom



Hydrogen molecule



Muonic hydrogen molecule

Fig. 6. Muon - catalyzed fusion.

여 백

제 3 장 뮤온 상온 핵융합에서의 충돌이론

제 1 절 뮤온(Muon)

1937년 Anderson 등이 negative 뮤온을 우주선 관측중에 최초로 발견하였다. 뮤온은 불안정한 소립자의 일종으로 질량은 전자보다 207배나 무겁고 수명은 $2.2 \mu\text{s}$ 이다. 뮤온의 기본적인 성질은 Table 2와 같다.

Table 2. Physical characteristics of muon

	μ^+	μ^-
m (MeV)	105.65946(24)	105.659(1)
spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
$\frac{\text{magnetic factor}}{2}$ (g/2)	1.001165910(12)	1.001165936(12)
life time in vacuum (τ)	$2.19711(8) \times 10^{-6}$	$2.948(10) \times 10^{-6}$
decay type	$e^+ + \nu_{\mu^-} + \nu_e$ (100%)	

뮤온은 파이온으로부터 생성되는데 파이온은 입자가속기를 사용하여 양자나 중이온을 고에너지까지 가속시켜 원자핵과 충돌시켜 발생시킨다.



전자보다도 무거운 뮤온, 파이온, K입자 등은 전자와 자리바꿈을 하므로서 원자를 만들수 있고 이것을 소립자 원자라고 한다. 전자원자에 비해서 소립자 원자의 바닥상태의 궤도 반경은 질량에 역비례하여 작게되고(Fig. 6참고), 반면에 결합에너지는 질량에 비례하여 크게되어 궤도 입자가 전자인 경우 -13.6eV 이고 뮤온인 경우는 -2.8keV 가 된다.

제 2 절 뮤온 촉매 핵융합 (Muon Catalyzed Fusion)

뮤온촉매 핵융합은 1957년 Alvarez에 의하여 액체 중수소 상태에서 처음으로 관측되었으며 현재까지 많은 연구가 되어오고 있으며 주요연구 현황은 다음과 같다. (9~12)

1937 : negative 뮤온발견(13)

1947 : MCF의 이론적 고찰(14)

1957 : MCF의 최초의 관측(15)

1967 : 뮤온입자 이온형성의 공명기구 제안(16)

1977 : d-t 혼합물에서 MCF의 큰 yield 를 예언(17)

뮤온 촉매 핵융합의 진행과정은 압축된 수소가스($n_0 = 4.2522 \text{ atoms/cm}^3$ 으로 정의된 액체수소 밀도)에 negative 뮤온이 입사되었을때 다음과 같은 chain 반응이 일어난다.

- μ^- 의 감속 (slowing down)
- 원자 level로 μ^- 가 포획되고 원자 바닥상태(1S)로 떨어진다.
- μ^- 분자형성과 분자바닥상태로 de-excitation
- μ^- 에 의해서 가깝게된 핵의 핵융합이 일어난다. (수소동위원소).
- μ^- 가 핵융합 생성물로 포획 또는 방출된다. (μ^- sticking)

만약 뮤온의 수명이 상기 chain반응 시간보다 길다면 많은 핵융합 반응이 일어날 수 있다. 이러한 chain 반응을 뮤온 촉매 핵융합(muon catalyzed fusion : MCF)이라 부른다.

Fig. 7에 MCF의 scheme을 나타내었다.

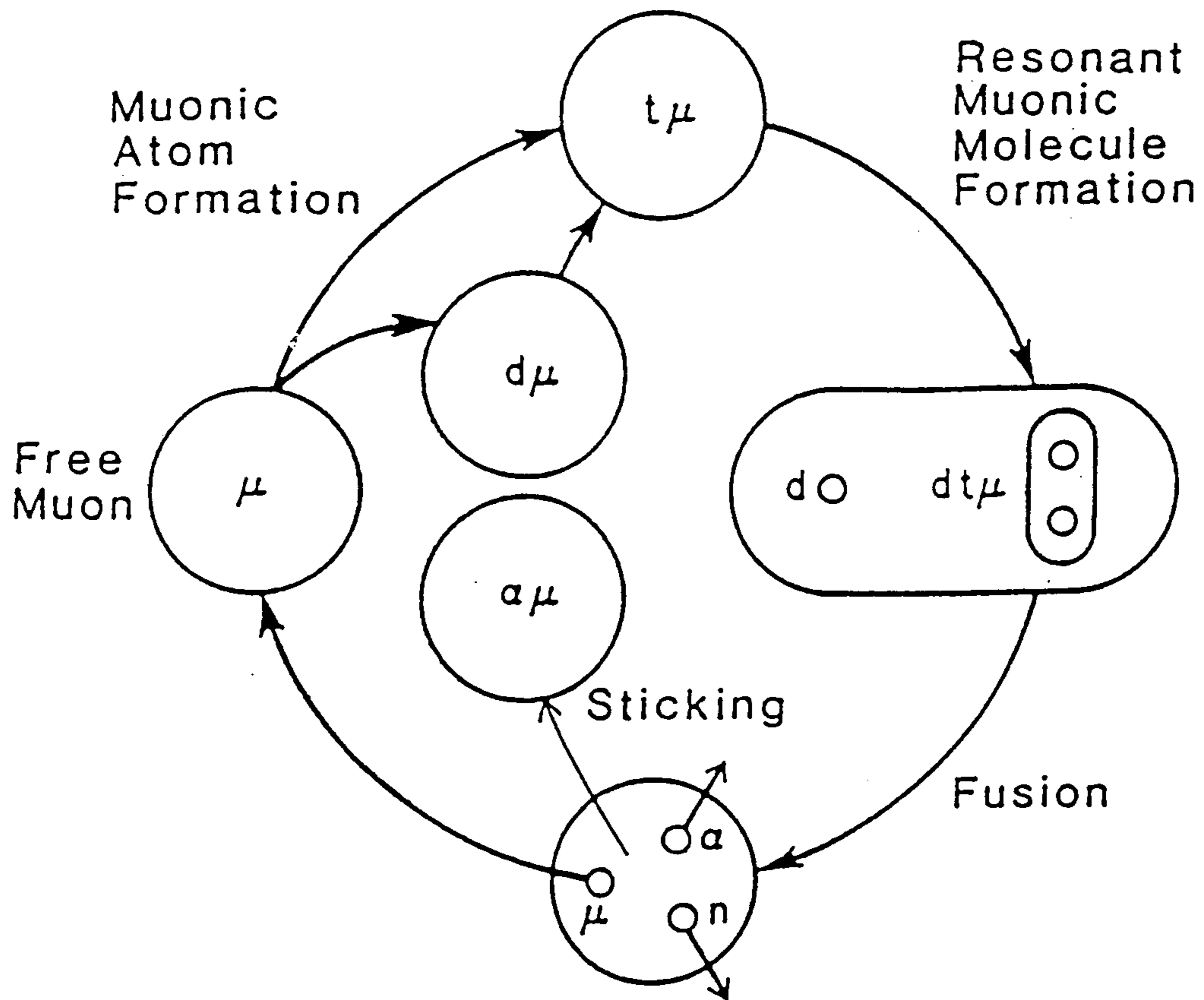


Fig. 7. The main dtu - catalysis cycle.

제 3 절 충돌이론에 의한 MCF의 STOPPING POWER와 SLOWING DOWN TIME 계산

뮤온 촉매 반응에 대하여 아래와 같은 실험 및 이론적인 연구가 되어오고 있다.

- dtu분자의 형성 및 공명현상
- 핵융합 속도
- 뮤온과 뮤온분자를 포함한 여러가지 반응단면적
- 뮤온 핵융합 생성물의 하나인 뮤온의 sticking 확률

현재 이러한 이론 및 실험결과에 대해 더욱 많은 이론적 연구가 요구되고 있는 실정이다. 본 연구에서는 고전적 binary-encounter 충돌이론을 사용하여 수소, 중수소, 삼중수소 속에서의 negative 뮤온에 대한 stopping power 와 slowing down time을 계산해 보았다.

그리고 그 결과와 이미 계산된 양자이론(complex 이론)에 의한 값과 비교해 보았다.

1. 충돌모델

중수소와 삼중수소 에서의 빠른 negative 뮤온의 에너지 손실속도 계산에서 사용한 단면적 식은 1927년 Thomas에 의하여 유도된 고전역학을 기본으로 한 원자충돌론(18)을 사용하였으며 다음과 같은 approximations을 적용하였다.

가. 입사입자는 원자전자에만 상호작용한다.

나. 원자전자(atomic electron)와 핵사이의 상호작용은 충돌하는 동안 은 무시될 수 있다.

즉, 충돌은 원자차원에 비하여 작은 영역에서 일어난다. Thomas는 뮤온으로부터 에너지 T가 원자전자로 전달되는 단면적을 다음식으로 나타내었다.

$$q(T)dT = \frac{\pi e^4}{E_1 + I_2 + E_2} \left(\frac{1}{T^2} + \frac{4E_2}{3T^3} \right) dT \quad (11)$$

여기에서 I_2 는 target 전자의 이온화 에너지 이며 E_2 는 그운동에너지이고 E_1

은 입사전자의 운동에너지 이다. 이번 계산에서 $D_2 - T_2$ 계의 원자전자와 입사 뮤온 충돌에 대하여 (11)식의 입사전자 대신 뮤온으로 치환해서 적용하였다. Fig. 8에 바닥상태에서의 수소원자의 이온화에 대한 단면적을 고전충돌이론으로 계산하여 양자이론(Born's approximations)에 근거하여 알려진 값과 비교하여 나타내었다. (19)

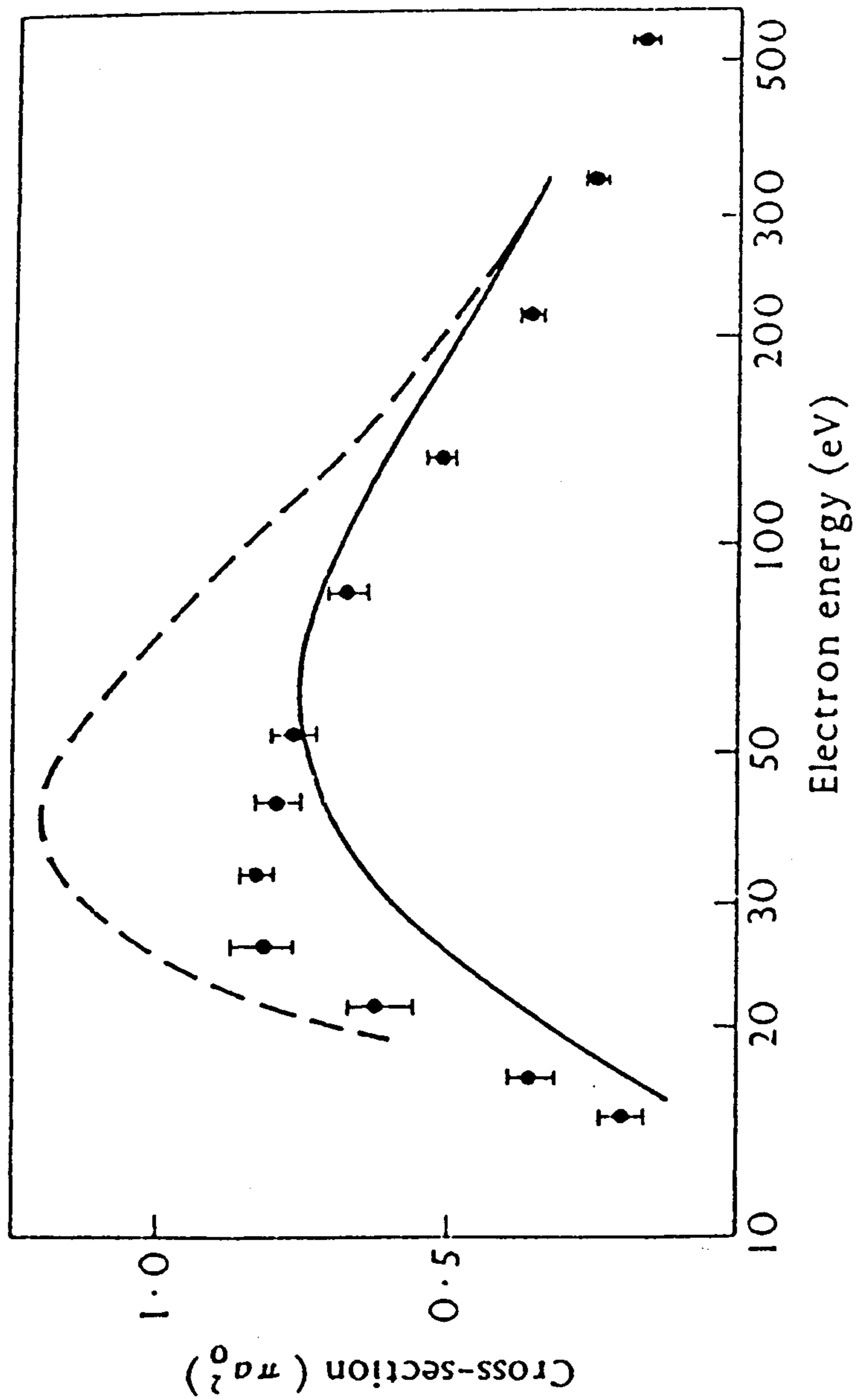


Fig. 8. Cross - sections for ionization of atomic hydrogen in the ground state. \blacklozenge calculated classically by the Monte carlo method. — observed. --- calculated by Born's approximation

2. 결 과

Negative 뮤온의 stopping power 와 slowing down time 의 계산은 식 (11)

의 E_1 을 $\frac{1}{2} m_1 V_1^2$ 로 치환한 다음식을 사용하였다.

$$q(T)dT = \frac{\pi e^4 z_1^2}{(\frac{1}{2}) m_1 V_1^2 + I_2 + E_2} \left(\frac{1}{T^2} + \frac{4E_2}{3T^3} \right) dT \quad (12)$$

$q(T)$: 단위 에너지 전달당 미분 단면적

m_1 : 입사입자의 질량

V_1 : 입사입자의 속도

I_2 : 표적입자의 결합에너지

E_2 : 표적입자의 운동에너지

T : 입사입자로부터 표적입자로 전달되는 에너지

뮤온에 대한 stopping power 와 slowing down time은 $q(T)$ 로부터 쉽게 구할 수 있다.

가. STOPPING POWER($-dE/dx$)

$$-dE/dx = \int_{T_{min}}^{T_{max}} NTq(T)dT$$

N : 표적입자의 밀도

T_{min} : 표적입자의 최저 여기에너지

T_{max} : 최대 전달 가능 에너지

뮤온에 대한 stopping power에 기여하는것은 전자와 핵이므로 전자에 의한 stopping power (S_e)를 계산하기 위하여 뮤온의 질량은 $1.89 \times 10^{-25}g$, 전자의 질량은 $9.11 \times 10^{-28}g$ 을, 여기에너지 (T_{min})는 11.18eV, 전자의 운동에너지(E_2)는 13.6eV를 각각 사용하였고 최대 전달 가능 에너지 (T_{max})는 $4m_1m_2E_1$

$/(m_1 + m_2)^2$ 이고 m_1 과 m_2 는 뮤온과 전자의 질량이다. 그리고 nuclear stopping power (S_n)의 계산에 대해서는 H_2 , D_2 , T_2 의 진동 여기 에너지에 대하여 0.52eV, 0.37eV, 0.34eV를 각각 사용⁽²⁰⁾하였으며 밀도 N 은 Table 3과 같다.

Table 3. Density⁽²¹⁾ of H_2 , D_2 , T_2

	H_2 (nuclei/cm ³)	D_2 (nuclei/cm ³)	T_2 (nuclei/cm ³)
gas	0.54×10^{20}	0.54×10^{20}	0.54×10^{20}
liquid	4.25×10^{22}	5.09×10^{22}	5.44×10^{22}

기체상태와 액체상태의 H_2 , D_2 , T_2 에 대한 stopping power의 결과를 Fig. 9와 Fig.10에 각각 나타내었다.

나. 뮤온의 운동에너지가 E_0 에서 E' 로 감소할때의 SLOWING DOWN TIME t' 의 계산

$$t' = \int_{E_0}^{E'} (dt/dx) (dx/dE) dE$$

$$= \int_{E_0}^{E'} \frac{1}{\sqrt{2E/m_1} (dE/dx)} dE$$

m_1 : 뮤온의 질량

E' : slowing-down 뮤온의 운동에너지

E_0 : 뮤온의 초기운동 에너지 (10keV)

뮤온 촉매 핵융합에 있어서 뮤온은 핵융합에 따르는 뮤온분자의 뮤온원자를 형성하는 것이 중요하다. 뮤온 촉매 핵융합의 각 cycle에서 자유뮤온은 에너

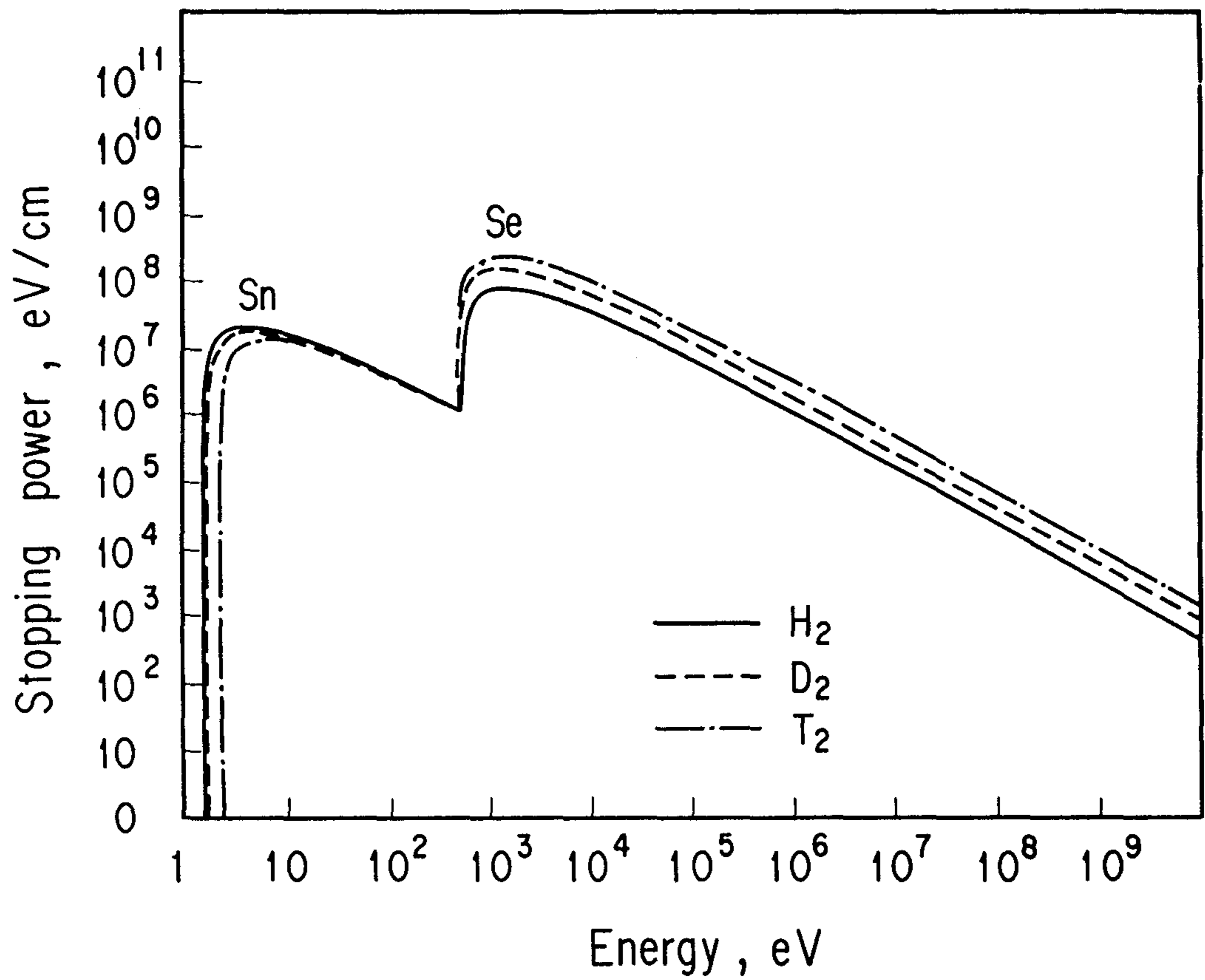


Fig. 9. Stopping power for negative muon in gas hydrogen.
 Se : electronic components, Sn : nuclear components.

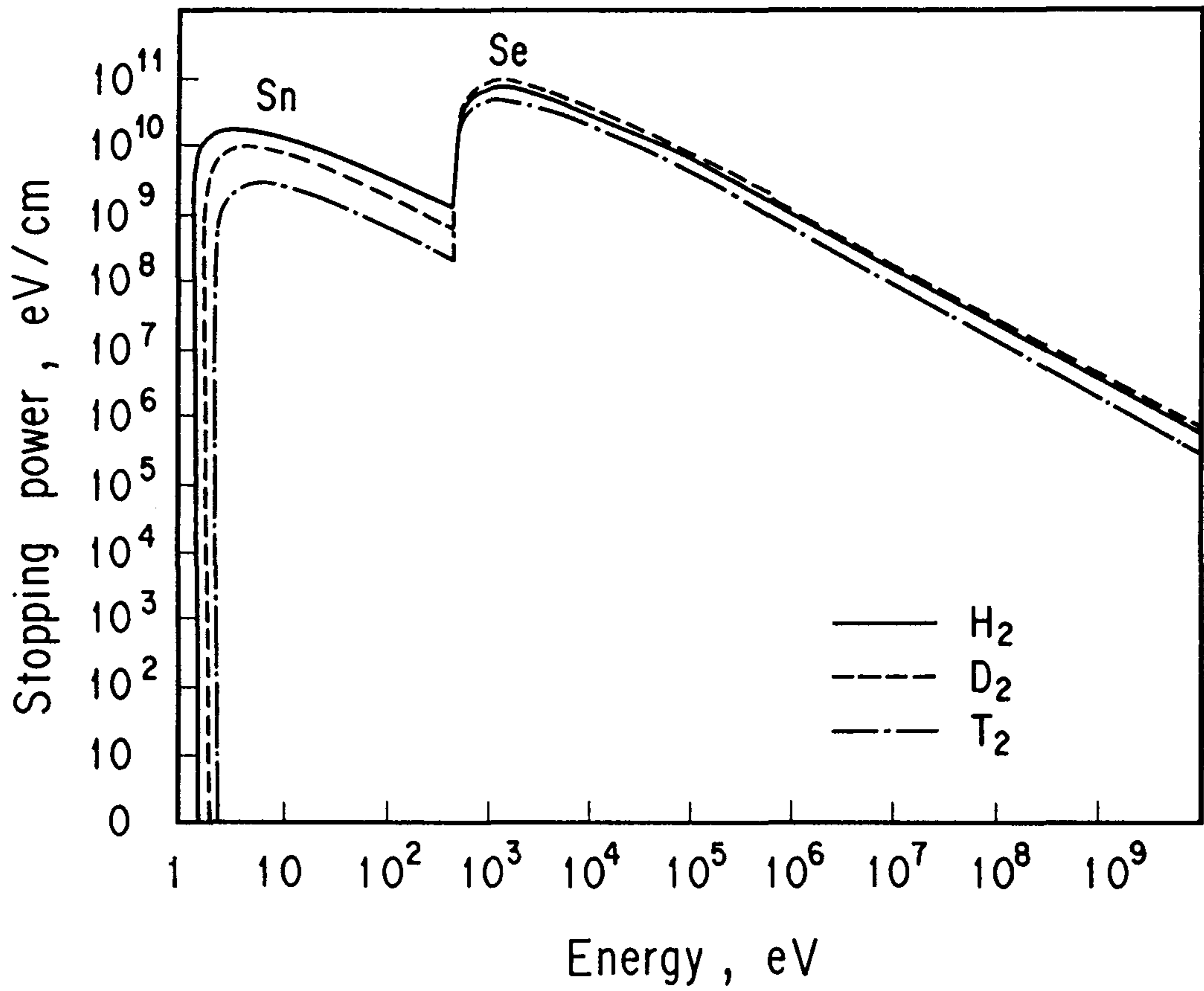


Fig.10. Stopping power for negative muon in liquid hydrogen.
 Se : electronic components, Sn : nuclear components.

지가 10 keV정도 생성되는것으로 예상되어서 10keV 뮤온의 slowing-down time 을 계산해 보았다. 기체수소와 액체수소에서의 slowing down time을 Fig.11와 Fig.12에 각각 나타내었다. 여기에서 계산한 $D_2 - T_2$ 계에서의 뮤온의 slowing-down time은 $10^{-12}s$ 로서 양자이론으로 계산된 값과 잘 일치하였다.

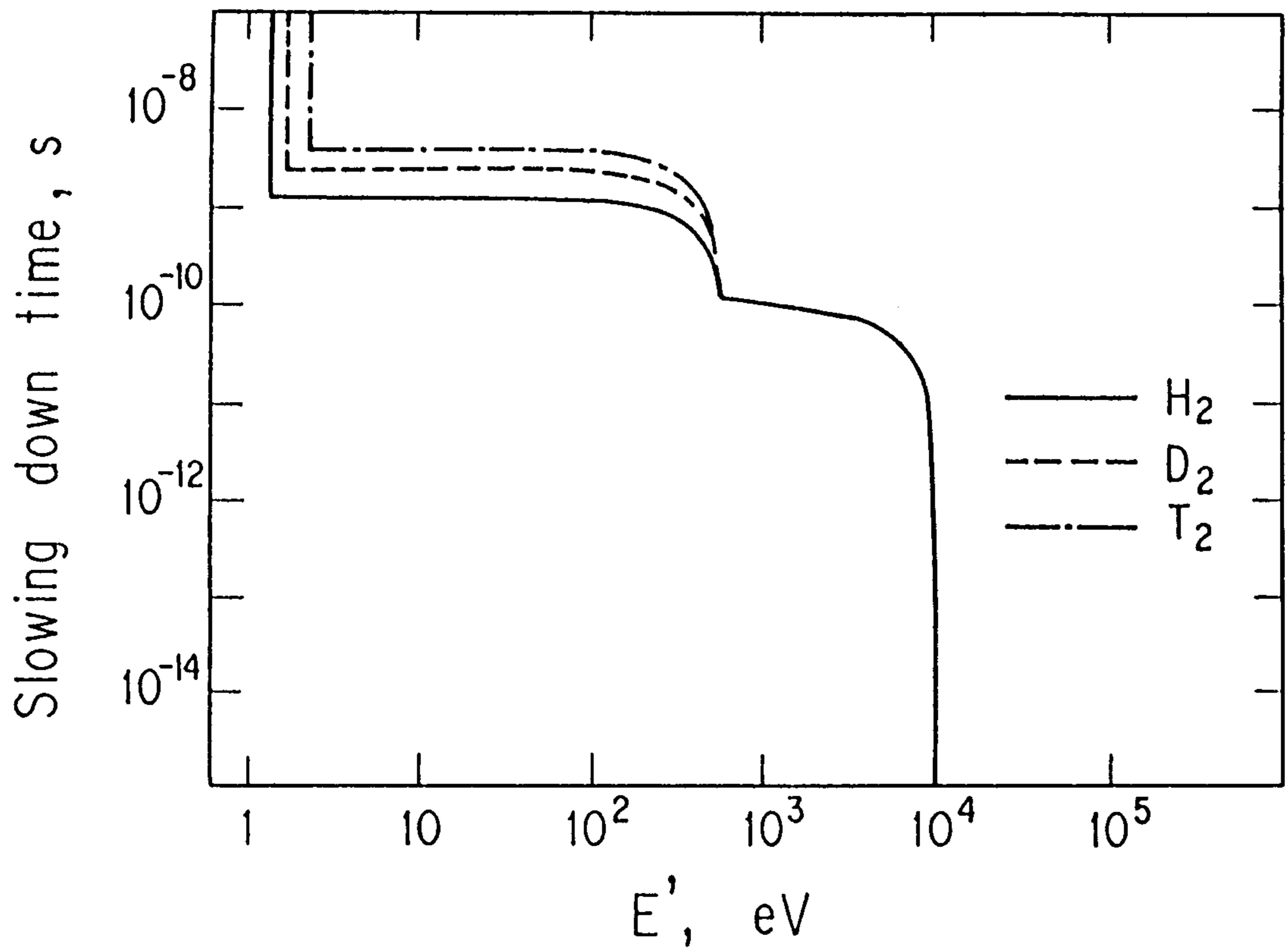


Fig.11. Slowing down time for negative muon in gas hydrogen.

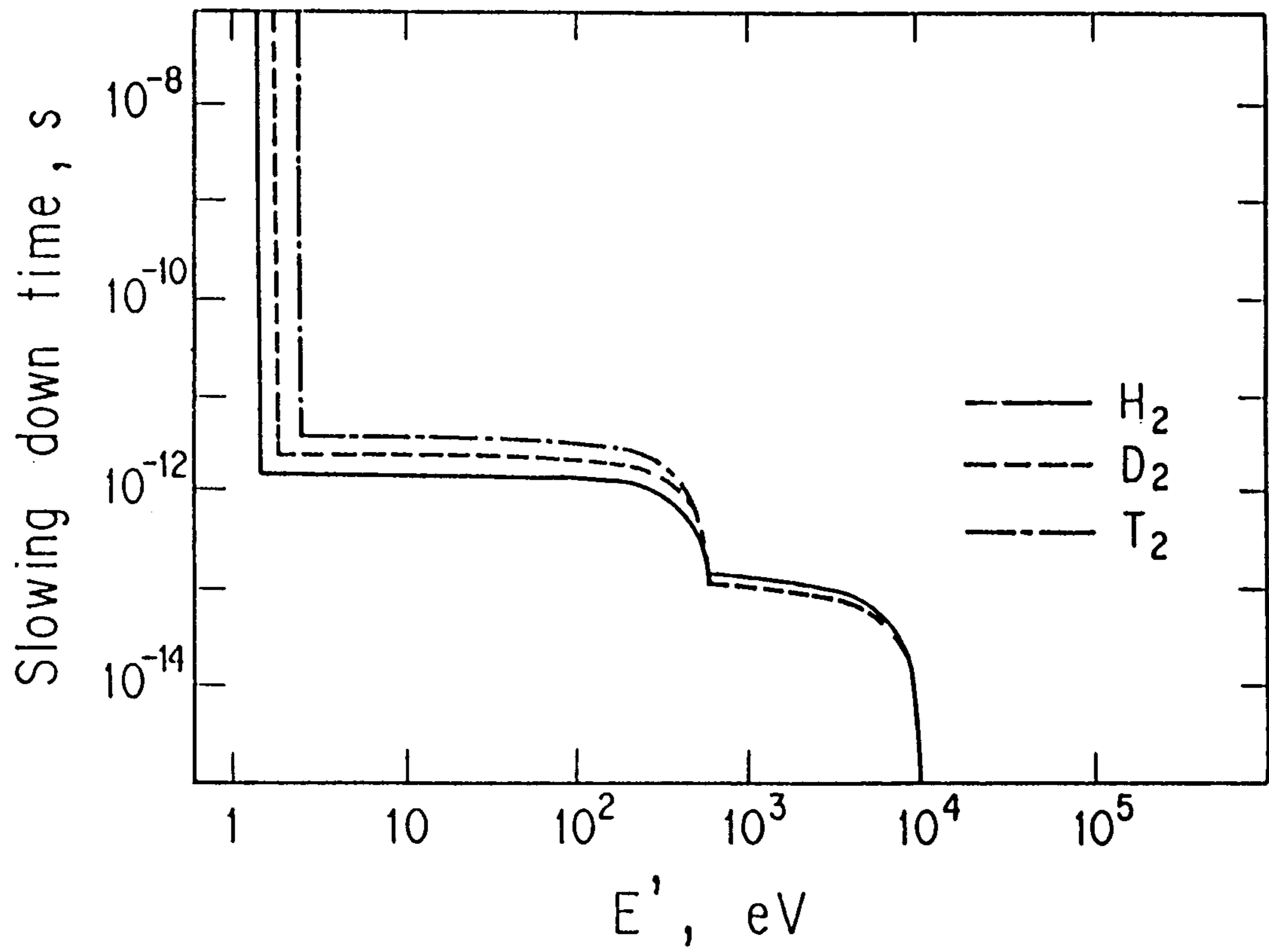


Fig.12. Slowing down time for negative muon in liquid hydrogen.

여 백

제 4 장 결 론

1989년 3월 전기분해법에 의한 실험실에서의 핵융합 반응이 발표된 이후 많은 실험들이 세계 각국에서 추진되어 왔다. 그러나 그 실험 결과들이 재현성을 나타내지 못하고 혼미한 상태로 결론을 내리지 못하고 있다. 그결과 전기분해법에 의한 상온 핵융합의 연구에 많은 문제점이 대두되고 있는 실정이다. 한편 뮤온을 촉매로한 상온핵융합에 Thomas의 고전역학적 원자충돌론을 적용하여 계산한 결과 기체상태의 H₂, D₂, T₂속에서의 negative 뮤온의 핵에 의한 stopping power는 전달에너지가 2eV 부근에서 최대값($\approx 10^7$ eV/cm)을 가지고 전자에 의한 stopping power는 전달에너지가 10³eV 부근에서 최대값($\approx 10^8$ eV/cm)으로 나타났으며 액체상태의 H₂, D₂, T₂ 속에서의 핵에 의한 stopping power는 2eV 부근에서 최대값($\approx 2 \times 10^9$ eV/cm)을 갖고 전자에 의한 stopping power는 10³ eV 부근에서 최대값 ($\approx 5 \times 10^{10}$ eV/cm)으로 나타났다. 기체수소속에서 초기에너지가 10 keV인 자유 뮤온의 에너지가 10eV 될때까지의 slowing down time은 대략 10⁻⁹s이고 액체수소에 대하여는 대략 10⁻¹²s로 나타났으며 양자이론으로 계산한 값과 잘 일치하였다.

상기 결과는 뮤온의 sticking 확률계산과 뮤온 촉매 핵융합 반응을 계산에 적용할 예정이며 위의 계산에 사용된 식은 binary collision model로서 다른 입자를 포함한 차원에 비하여 작은 영역에서 충돌이 일어날때 편리하며 뮤온 촉매 핵융합과 같은 complex현상을 이해하는데 간단하고 유용하게 사용될수 있을 것으로 생각된다.

여 백

참 고 문 헌

- (1) M. Fleischmann, S. Pons, and M. Hawkins, *J. Electroanal. Chem.*, 261, 301 (1989).
- (2) J. Byrene, P.G. Dawber, J.A. Spain, A.P. Williams, M.S. Dewey, D.M. Gilliam, G.L. Greene, G.P. Lamaze, R.D. Scott, J. Pauwels, R. Eykens, and A. Lamberty, *Phys. Rev. Letters.*, 65(3), 289 (1990).
- (3) L. Esaki, *Phys. Rev.* 109, 603 (1958).
- (4) T. Miyazaki, and K.P. Lee, *J. Phys. Chem.*, 90, 400 (1986).
- (5) K.P. Lee, T. Miyazaki, K. Fueki, and K. Gotoh, *J. Phys. Chem.*, 91, 180 (1987).
- (6) S.E. Koonin and M. Nauenberg, *Nature* 339, 690 (1989).
- (7) K. Nagamine et al., *Proc. of DOE Workshop on cold Fusion Phenomena*, Santa Fe (1989).
- (8) J.O'M. Bockris, G.H. Lin and N.J.C. Packham, *A Review of the Investigations of the Fleishmann-Pons Phenomena* (1990).
- (9) "Muon Catalyzed Fusion and Fusion with Polarized Nucle," Ed. by Brunelli, B and Leotta, G. G., *Plenum Press*, New York (1987).
- (10) Massey, H. S. W., Burhop, E. H. S. and Gilbody, H. B., "Electronic and Ionic Impact Phenomena," Vol. V, *Clarendon Press*, Oxford (1976).
- (11) Nagamine, K., *Nihongenshiryoku gakkaiishi*, 30, 300 (1988).
- (12) Kamimura, M., *Proc. 5th Int. Conf. Clustering Aspects in Nucl. and Subnucl. Systems*, Kyoto, 1988 ; *J. Phys. Soc. Jpn.*, 58, 493 (1989).
- (13) C.S. Anderson and S.H. Neddermeyer, *Phys. Rev.* 50, 263 (1936).
- (14) F.C. Frank, *Nature* 160, 525 (1947).

- (15) L.W. Alvarez et al., Phys. Rev. 105, 1127 (1957).
- (16) E.A. Vesman, Zh. Eksp. Teor. Fiz. Pisma 5, 113 (1967).
- (17) S.S. Gerstein and L.I. Ponomarev, Phys. Lett. 72B, 80 (1977)
- (18) L.H. Thomas, Proc. Camb. Philos. Soc., 23 829 (1927).
- (19) M. Gryzinski, Phy. Rev., 138, A336 (1965).
- (20) I. F. Silvera, Rev. Mod. Phys., 52 393 (1980).
- (21) E.R. Grilly, J. Amer. Chem. Soc., 73, 5307 (1951).