

凝集体内核融合の研究

大阪大学工学研究科原子力工学専攻

高橋 亮人

akito@nucl.eng.osaka-u.ac.jp

1. はじめに

2003年1月31日、東京四谷の弘済会館で日本学術振興会主催の「非熱核融合」特別講演会が行われた。定員30人ほどの会場に80人ほどが詰め掛けて、ひさしぶりに熱気のある講演会となった。聴衆には、伏見康治先生、有馬朗人先生、山崎敏光先生、などの長老の物理学者のほか、谷畑勇夫（理研）、柴田徳思（KEK）、などの“現役”がいて、講演者を含めて活発な質問・討論があった。世話人代表の高良和武先生（東大・KEK 名誉教授）の挨拶の後、南園忠則教授（阪大物理）の司会で、4人が講演し、一人がコメントトークした。

池上栄胤先生（ウプサラ大客員教授、阪大名誉教授：RCNP）の「熔融金属リチウム中のLi+d核融合加速」^{1,2)}のタイトルでの80分のメイン講演がまずあった。「重陽子ビームエネルギーが30keVより下の領域で、リチウムターゲットが液体になったとき、既知の核反応理論の 10^{13} 倍の反応異常増大が観測された¹⁾」。理論的には、LiのS電子軌道内に出来た“融合原子LiD”の熱力学的活性のアルレニウス則で、核融合反応の増大が説明できる²⁾とするものである。これに対して、「熱平衡の仮定は無理である、など」の河合光路先生（九大名誉教授）の反論コメントがあった。

続いて、高橋亮人（阪大）が、「凝集体内核融合の物理」と題して40分講演した。「低エネルギー重水素核融合のPdDx格子系過渡現象での異常増大が、過渡的なボソン化電子対（準粒子）のつくる短寿命のDD分子状態の形成で、説明できる」^{3,4,5,6)}とする理論及び「凝集体内のコヒーレントな過程がリンクした核反応の証拠としての、三体DDD核融合反応異常増大の実験データ」^{7,8)}が紹介された。これについては、あとで、もう少し詳しく述べる。

続いて、北村晃教授（神戸商船大）から、「重陽子注入固体内の重水素密度と核融合反応率の異常増加」と題して、30分の講演があった。「金薄膜で表面修飾したPdに20keVまでのD⁺及びD₂⁺ビームをあてると、通常理論の数百倍のDD反応が起こった」^{9,10)}。こ

れについても後で紹介する。

最後に、笠木治郎太教授（東北大）が、「固体金属中での核融合：金属は原子核反応の特異環境か？」¹¹⁾と題して40分講演した。「10keV以下で、DD核融合反応率がホストの金属の種類と化合物状態に依存する。異常増加率を遮蔽エネルギーで表すと、Pd中では1800eVであるのに対して、金(Au)中では60eVに過ぎない」。解説記事が最近の日本物理学会誌に載っている¹¹⁾ので、お読みいただきたい。

これらの最近の研究は、次のことを示唆している。「凝集体内での重水素関連核融合反応が、核反応は物性に無関係とする既知の核物理理論、すなわちランダムな二体核反応の理論の予測を大きく超えて増大すると言う、実験的証拠と見なされる。ならば、凝集体物理（固体物理）と核物理がリンクした現象があることになる」。これは、新しい学問領域が開くことを意味するので大変興味がある。また、延長線上では、エネルギー源開発への応用も期待できる。

お気づきのように、これらの研究は、いわゆる「常温核融合」研究との関連が深い。実際に、高橋、北村、笠木の研究は、常温核融合研究の延長線上で進められてきたものである。常温核融合研究は、1989年の大フィーバーや1992年頃の小フィーバーのあと、世界の学界の表面からは忘れられているが、細々とした研究活動が続き、9回の国際会議（ICCF1~9）も行われた。1989~2000年の主な研究成果については、筆者らの共著書「固体内核反応研究 No.1」（工学社、1999年12月刊）¹²⁾に纏めているので、一読いただければ幸いである。当初の、「試験管核融合、すなわち電気分解での過剰熱異常現象」から、「凝集体内のさまざまな条件下での、核融合を含む低エネルギー核反応の異常現象の可能性」を地道に追究する研究活動が主体となって、続いていると言える。

以下に、主な実験事実、理論モデルの順に紹介して、最後に今後の方向を述べる。

2. 主な実験報告

2.1 DD核融合異常増大と三体反応

DD反応やDT反応は、加速器中性子源でお馴染みである。低エネルギー（普通300keV以下）のD⁺ビームをTiD_xやTiTxなどの固体ターゲットにあててDD反応やDT反応で中性子を発生させて、核データの測定に用いられてきた。D⁺ビームは固体ターゲットの中で電離・衝突過程で減速していくが、その過程でDDまたはDT反応を起こす。DD反応に話しを限ろう。はじき出されたDイオンによる逐次的なDD反応を含めて、このビーム・ターゲット反応の過程は、TRIM(SRIM)¹³⁾などのシミュレーションコードで、ほぼ正確に計算できることが知られている。実際にも、TiD_xやPdD_xのターゲットで実験するとTRIMでの計算にほぼ一致したDD反応率が10keV以下のD⁺ビームエネルギーに至るまで得られる。ここでxは、重水素原子比で、通常x<1.0である。ところが、表面修飾などのターゲット状態の変化により異常に増大したDD反応率が得られると言う実験結

果がでてきたのである^{1,9,10,11)}。

北村ら(神戸商船大)^{9,10)}の実験の一部を紹介しよう。研究は、イオンビーム照射によって引き起こされる重水素吸蔵金属中の DD 反応などの固体内核反応の収率の異常増加が、ターゲット組成などの条件にどのように依存するかを調べることを目的としている。そのために in-situ で重水素を吸蔵してから低エネルギーのイオンビームを照射している。また、ERDA/NRA の手法で in-situ で試料の表面近傍の D 濃度などを分析している。図-1 に実験体系の概略図を示している。注入用の D⁺ビームは、20keV の D⁺ビームを用いて

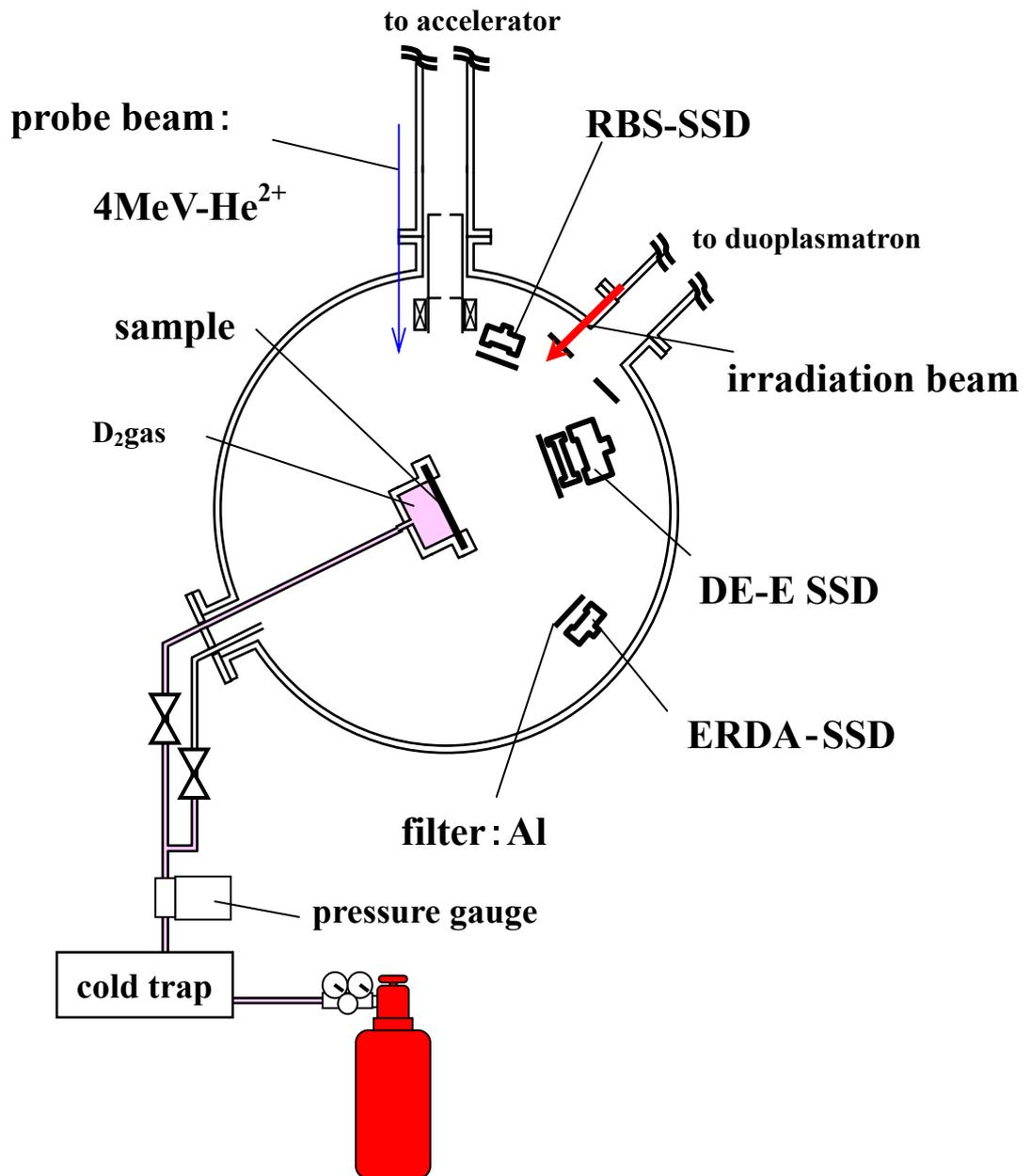


図-1 : 北村らの DD 反応のターゲット組成条件依存性測定の実験概略図^{9,10)}

いる。また照射用には、15~25keV の D^+ または D_2^+ ビームを用いている。ターゲットには、Pd 板、及び 66~148nm 厚さの Au で表面修飾した Pd を用いている。ターゲット試料内の D の動きをダイナミックにするために、背面を 1 気圧の D_2 ガスで満たして、ビームのあたる真空側に向かって常時 D が透過拡散する条件としている。これは後で述べる MHI の岩村らの核変換実験の条件と似ている。ターゲット内の元素分布は、4MeV/He のプローブビームをもちいて RBS (ラザホード後方散乱法) と ERDA (弾性散乱反跳粒子分析法) で分析している。核反応荷電粒子の分析は、 ΔE -E カウンターテレスコープを用いて分析している。結果を図-2 に示す。

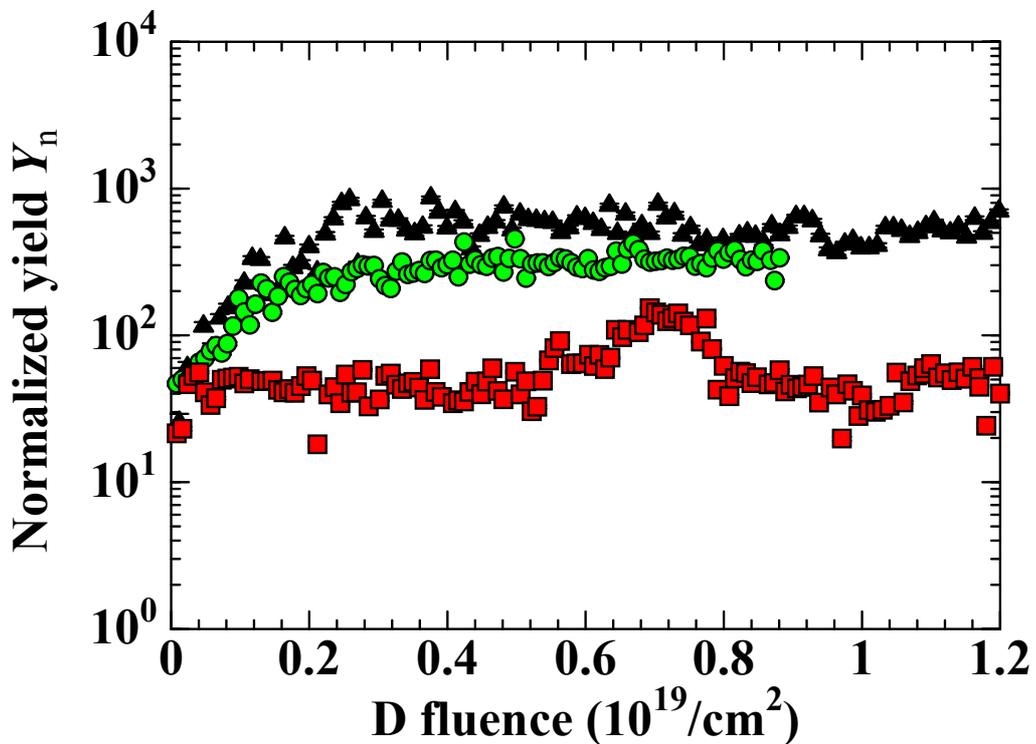


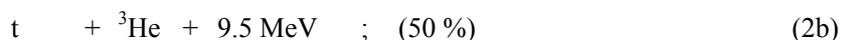
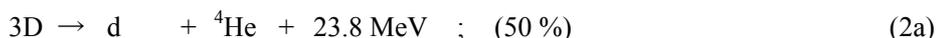
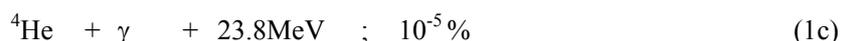
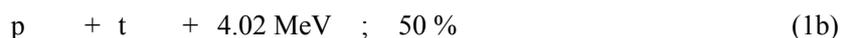
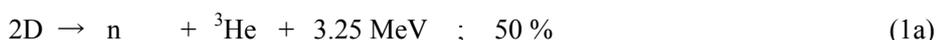
図-2 : 北村らの Au/PdDx サンプルでの DD 反応異常増加の実験結果 ; Y_n は実験による DD 反応の 3MeV 陽子の収率と TRIM 計算による通常理論の DD 反応計算値の比を示す。三角印は、Au66nm/ D_2^+ 15keV のデータを示す。丸印は、Au72nm/ D_2^+ 20keV のデータを示す。四角印は、Au148nm/ D_2^+ 25keV のデータを示す。^{9,10)}

D_2^+ 分子イオンを用いているので、 D^+ あたりのエネルギーは、7.5keV, 10keV, 12.5keV となっている。Au 表面修飾の条件とビームエネルギーの違いにより異常増倍率 Y_n が変化している。また、照射経過を示すフルーエンスとともに Y_n が変化している。異常増倍率は最大で 800 倍となっている。ERDA の測定から、Pd 層との境界から約 100nm 深さのと

ころに D 密度の極大が存在している。最大 D 密度は $1.8 \times 10^{23} \text{cm}^{-3}$ に達していて、ガス吸蔵法による通常の飽和値の約 3 倍となっている。また、そのあたりでは、Pd と Au の混合層が形成されている。

これらの異常な Yn のデータとその振る舞いは、ターゲットサンプルの凝集体物理のダイナミックな条件に依存していると解釈されるので、非常に興味がある。通常のビーム・ターゲット反応では、凝集体内電子の遮蔽効果は、トーマスフェルミガス（パウリの排他律によるフェルミ粒子性）として働きユニバーサルポテンシャルの形で TRIM 計算などの通常の理論モデルに組みこまれている。実験は、条件により、その 100 倍以上の反応増大を示している。また、笠木ら¹¹⁾の別の試料 (PdO) での実験だが、10keV 以下で 2keV に至るより低エネルギーでの実験では、数桁の異常増加率が観測されている。このことは、電子による DD 間クーロン力の遮蔽モデルで電子がトーマスフェルミガスの限界を超えた働きをしていることを示唆している。理論モデルのところではこのことを掘り下げて議論する。

阪大の高橋ら^{7,8)}は、PdDx などの格子系の動的過渡現象では、三体 DDD 同時核融合 (3D 反応と以下書く) や 4D 反応などのクラスター核融合の反応率が異常に増大する可能性があると考えて、低エネルギーのビーム・ターゲット反応系でここ 10 年ほど実験をつづけてきた。最近になって、かなり有力なデータが得られているので概略を紹介する。クラスター核融合として、通常の二体 DD 反応から 8D 反応までを扱うので、典型的な反応生成粒子のチャンネルについて反応式を下に記しておく。



ここで、生成粒子の運動エネルギーは Q 値を質量の逆比で分配した値となる。また、 ${}^8\text{Be}$ は、寿命が $6.7 \times 10^{-17} \text{s}$ で $2\alpha({}^4\text{He})$ に崩壊する。3D 反応の分岐比は、著者らの実験で最近得られた大体の値である。

高橋らは、3D 反応 (2b) と 2D 反応 (1b) の反応率比を検出することを試みた。チャンネル (1b) では、3MeV のプロトンに注目した。また、チャンネル (2b) では、 ^3He とトリトン (t) は質量がほぼ等しいので、ともに 4.75MeV の運動エネルギーで発生する。このあたりのエネルギーのトリトンと ^3He は、 D^+ ビームとターゲット中に存在するかもしれない軽元素不純物 (T, Li, Be, B, C, N, O など) の反応では発生しない^{7,8,14)}ので、検出できれば、3D 反応の非常に有力な証拠となる。図-3 に高橋らの実験体系図を示す。ガス吸蔵法で $x>1$ を実現した 1mm 厚さの TiD_x 板状サンプルをターゲットとしている。試料は背面よりペルチエ素子で冷却している。 D^+ ビームは 50keV から 300keV の 6 点 (50, 70, 100, 150, 200, 300) について実験している。 ΔE -E カウンターテレスコープによる粒子同定と E_k 検出器による粒子運動エネルギーの同定を行っている。TRIM コードの計算で、2D と 3D 反応の粒子の ΔE 及び E 検出器でのエネルギー付与とレンジをもとめて、レスポンスを予測した図を図-4 に示す。

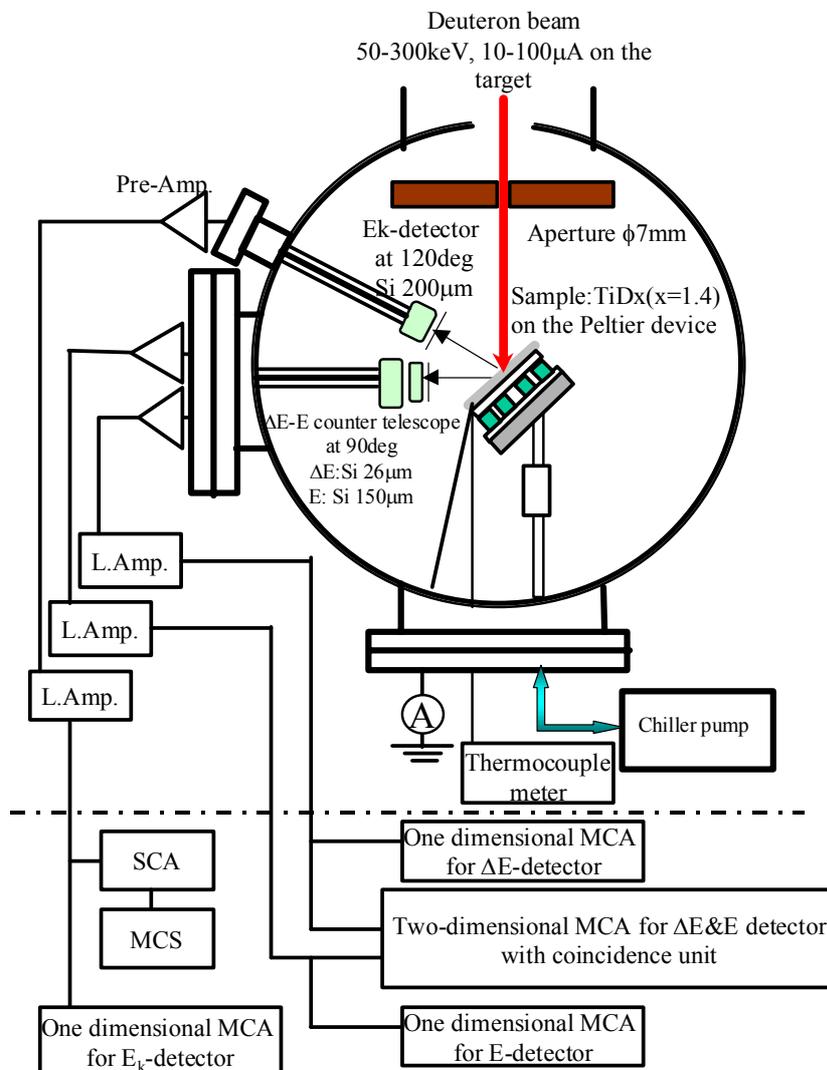


図-3 : 高橋らの D^+ ビーム注入実験の体系図

180度反対方向に発生する4.75MeVの ^3He と t をコインシデンス測定できればベストである。しかしそのためにはミクロンオーダーの非常に薄いTiDxサンプルを用いなければならない。そのような条件の実験も試みられたが、3D反応を示す有意の信号は検出できなかった。薄いサンプルでは、ビーム照射による局所発熱を冷却できず、吸蔵Dが放出してしまうために、良い条件が実現できない。結局、1mmと分厚いサンプルで冷却が充分だったときのみ、有意の3D反応信号が見られた。

図-5にEk検出器のスペクトルデータの例を示す。マークした領域に3D反応の ^3He と t の情報が2D反応のプロトン信号のパイルアップ信号と重なって現れていると思われる。図-6の上図に ΔE 検出器のスペクトルを示す。図-7にE検出器のスペクトルを示す。図-4の予測図と比較して、 ^3He とみなされるピークは少し低めに出ているが、3D反応の発生位置が D^+ ビームのレンジより深い位置にあると仮定すると理解できる。E検出器には、2D反応プロトンと3D反応のトリトンらしい肩が見える。

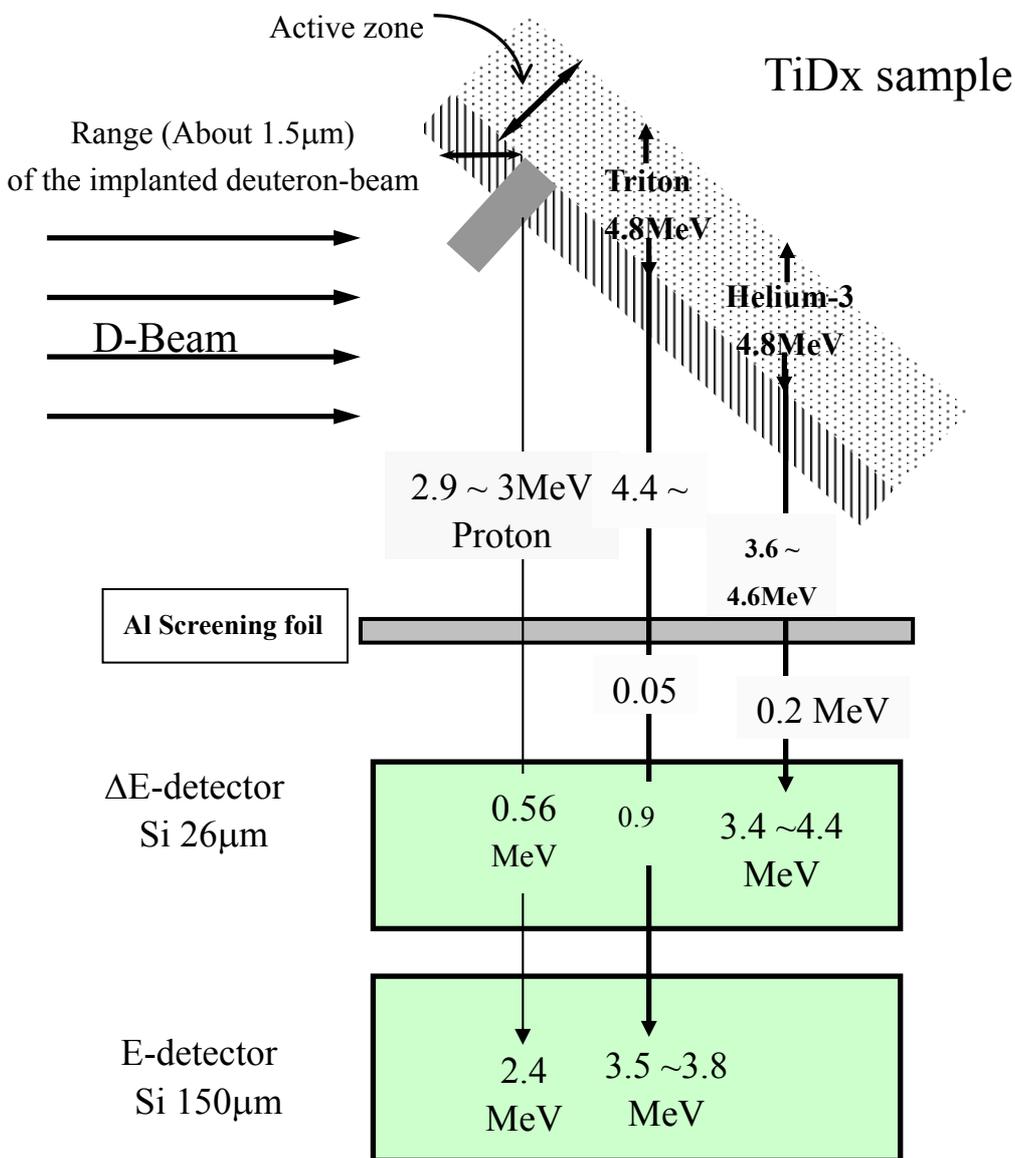


図-4 : 2D 反応と 3D 反応の荷電粒子レスポンスの TRIM 計算による予測値

Ek 検出器信号にパイルアップ除去回路（一種の波形弁別）を導入した結果¹⁵⁾、4MeV 前後のブロードピークが残ったので、E 検出器の 3.5MeV 付近の肩は 3D 反応のトリトンと思われる。トリトンであることは、 ΔE と Ek と計数の三次元マップ⁷⁾からも確認された。

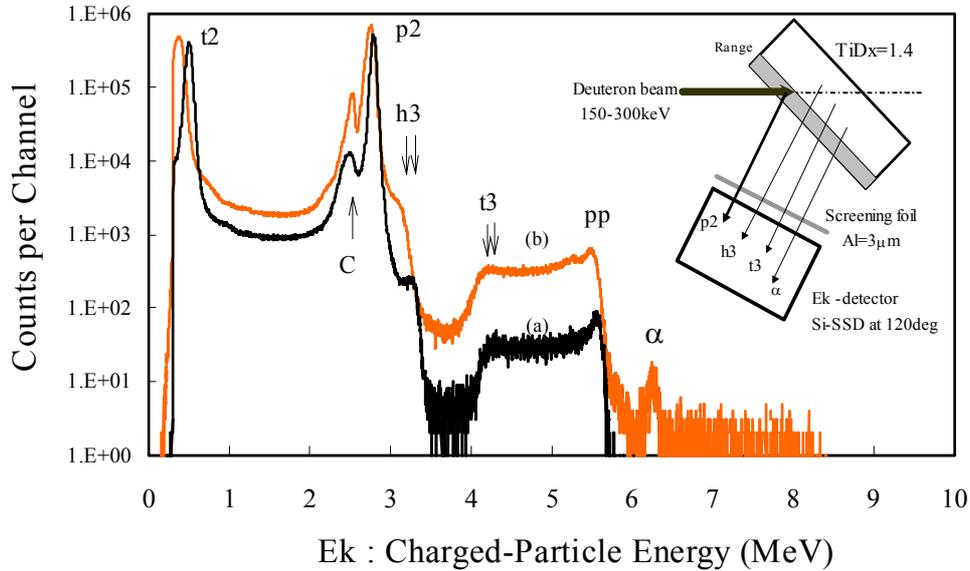


図-5 : Ek 検出器のスペクトル、t2 は 2D 反応のトリトン、p2 は 2D 反応のプロトンを示す。また、h3 と t3 は 3D 反応の ^3He とトリトンの位置を表す。また、pp は 2D 反応プロトンのパイルアップピークである。(a) は D^+ ビーム 150keV, (b) は D^+ ビーム 300keV のデータである。

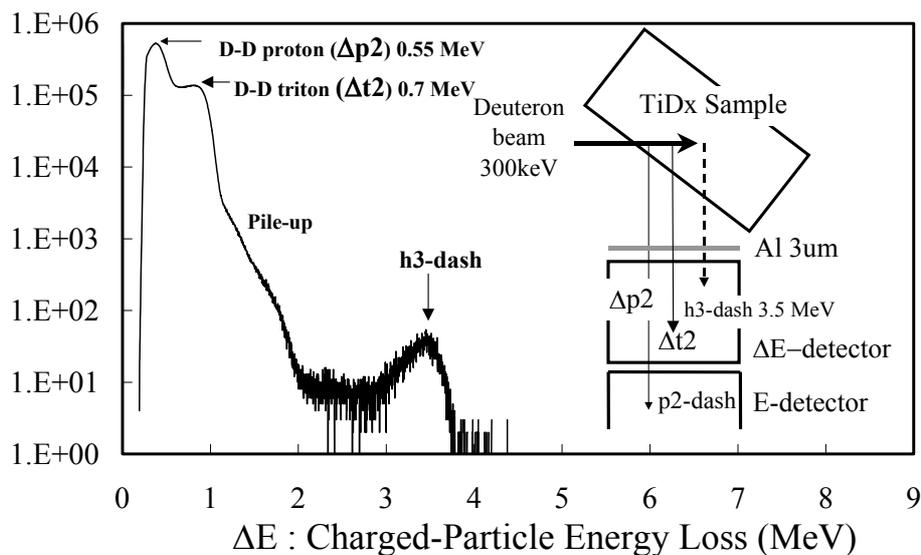


図-6 : ΔE 検出器のスペクトルの例、h3-dash が 3D 反応の ^3He と同定された

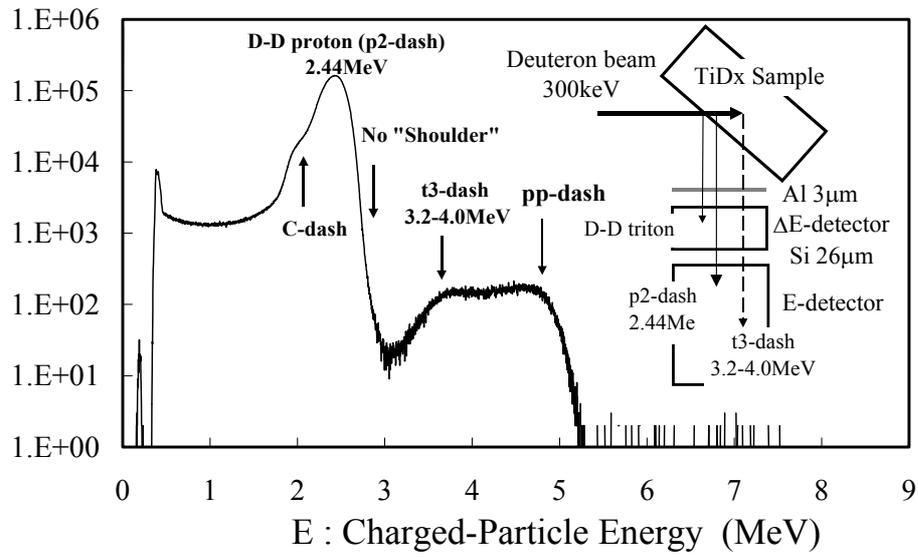


図-7 : E 検出器のスペクトル例、t3-dash が 3D 反応のトリトンと同定された

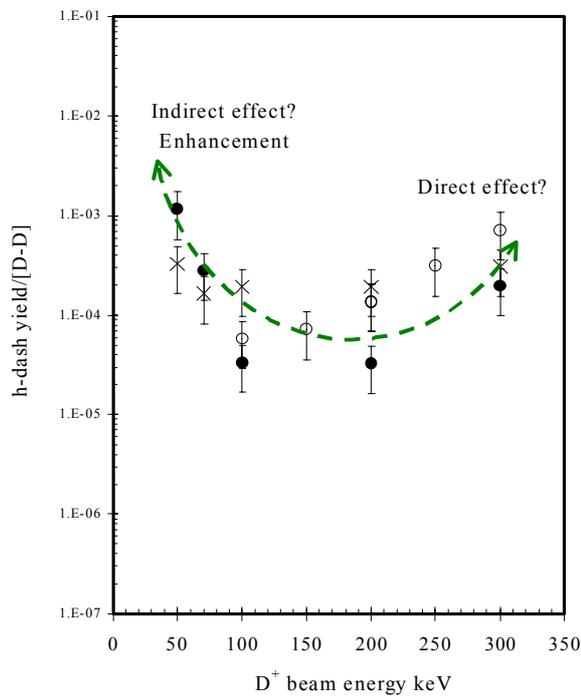


図-8 : [3D]/[2D]反応率比の D^+ ビームエネルギー依存性、
4.75MeV ^3He イールドと 3MeV プロトンイールドの比

ΔE スペクトルの h3-dash ピークのイールドを 3D 反応率[3D]とし、2D 反応率[2D]との比を D^+ ビームエネルギーの変化についてプロットすると図-8 のようになる^{3,16)}。実験値は、 $[3D]/[2D] \approx 10^{-4}$ のオーダーとなっている。一方、既知のランダム核反応のカスケード反応理論で計算すると⁸⁾、 $[3D]/[2D] \approx 10^{-30}$ のオーダーとなる。実験値は 26 桁の異常増大を示した。 D^+ ビームとの直接反応で 3D 反応が生じたと仮定すると、重陽子核間距離が 1 ピコメートルほどに接近した近接 DD ペアが、TiDx 中に D 密度の 10^{10} の確率で存在しなければならないことになる。しかし、 D^+ ビームエネルギーが 100keV 以下の低エネルギー側で比が増大する結果は、間接的な 3D 反応、すなわち D^+ ビームのレンジの外での 3D 反応の発生を意味していると思われる。いずれにしても、TiDx “格子の秩序ある過渡現象が関与したコヒーレントな核融合” のプロセスの存在を考えないと説明できないと思われる。

2.2 ^4He の発生と核変換

電解系及びガス系の実験で、中性子の発生は無視できるが、過剰熱と共に ^4He が相当量発生したとするクレームが数カ所からある¹⁷⁻²⁰⁾。米国海軍研の Miles¹⁷⁾が最初に報告した。筆者らも²⁰⁾、再現性は良くないが、表面修飾した Pd 陰極を用いた密閉系重水電解実験での ^4He 検出のデータがある。 D_2 と ^4He の分離は、質量数差 0.025 の弁別であるから難しいが、ゲッターポンプで重水素を低減したあとで、高分解能 4 重極質量分析系で問題無く測定できる。

^4He 発生 の報告では、荒田一 張の実験^{18,19)}が最も注目されている。阪大名誉教授の荒田吉明らは、5nm 径ほどの Pd のナノ粒子を用いて、二重構造陰極による重水電解法や超音波法で、大量の ^4He と過剰熱の発生を検出した。筆者らも測定に行ったが、中性子は発生していなかった。2D 反応のブランチ (1c) で ^4He は出るが分岐比はあまりにも小さい。また 2D 反応では、中性子やガンマ線の無いヘリウムの発生は考えられない。筆者は、凝集体内での秩序ある核融合のモデル^{12,7,8)}で、多体核融合 3D と 4D の異常増大により、チャンネル(2a)と(3)から発生すると考えて研究を進めてきた。あとで、もう少し詳しく述べる。

ところで最近、三菱重工の岩村ら²¹⁾から驚くべき核変換のクレームがあった。実験は、Pd 板母材上に Pd/CaO/Pd の数ナノメートル厚さの多重層修飾をして、表面に Cs (または Sr) を薄くつけた試料を用いて、表面を一気圧の D_2 ガス雰囲気とし、背面 Pd 母材側を真空として、D を透過・拡散させるという、比較的簡単なものである。XPS により in-situ で表面の元素分析をした。一定以上の D 流量を保持して、1~2 週間実験すると、驚くべきことに表面に塗布した Cs(or Sr)が減少して Pr(or Mo)が増加した。軽水素で実験すると、核変換しない。また、CaO 層がないと重水素でも核変換しない。同位体の分析もした結果、 ^{133}Cs から ^{141}Pr への (または ^{88}Sr から ^{96}Mo への) 「選択的核変換」が起こったと考

えられると言う。実験結果の例を、**図-9**と**図-10**に示す。「質量が8で原子番号（電荷数）が4増加する核変換」ということになる。筆者の理解では、高運動エネルギーの ^8Be が引き起こした反応と考えざるを得ない。PdDx格子のダイナミックスで、秩序ある特殊な条件が発生して8Dクラスター核融合が起こったとするモデル^{4,5}を真面目に検討している。(7)式の47.6MeVの ^8Be とCsの反応である。

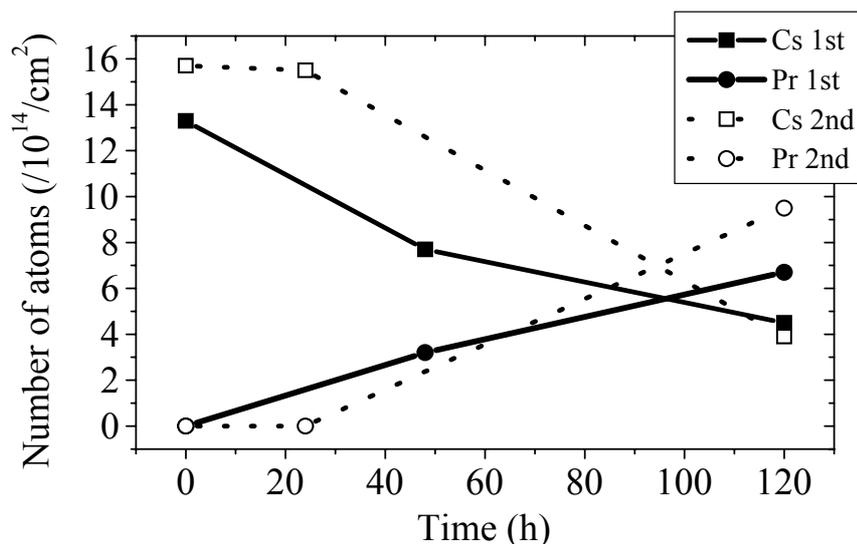


図-9 : MHI の岩村らによる多重層 Pd の重水素透過実験²¹⁾、Cs から Pr への核変換を示すデータが得られた。

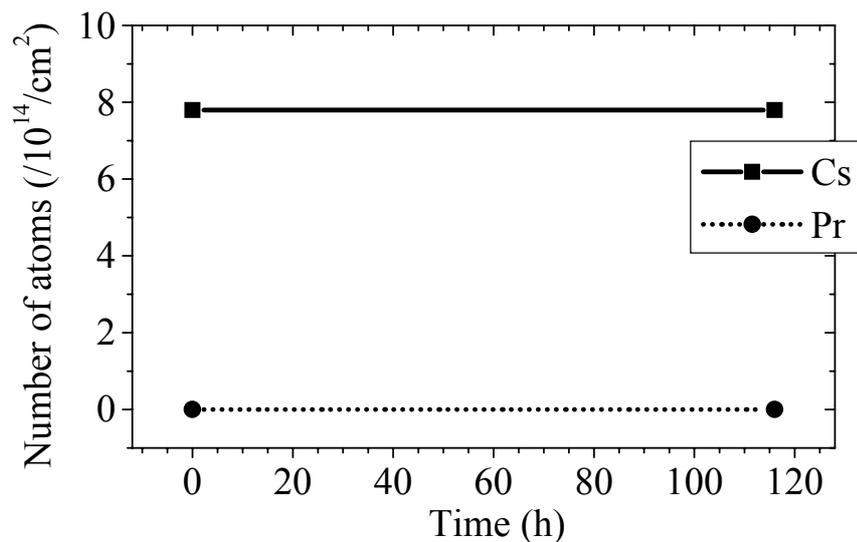


図-10 : MHI 岩村らによる多重層 Pd の軽水素透過実験、Pr の生成は認められない。

MHI の追試実験が複数箇所で行われたが、同様な結果を再現したと言う（論文は未発表）。中性子放射化分析（NAA）などでの更なる追究が待たれる。

核変換では、他にも奇妙なクレームが、北大の水野ら²²⁾、大森ら²³⁾、や米国イリノイ大の Miley ら²⁴⁾からなされている。まるで核分裂生成物（FP）を思わせるような、不純物のレベルを遥かに超えた出所不明の元素が多種発生すると言う。同位体比が天然の元素と大きく異なっているという。Pd や W が重水電解や軽水のプラズマ放電電解の実験に用いられている。また、ガス放電系でも同様な結果が報告されている¹²⁾。

筆者らは、もしも「Pd や W の核がなんらかの理由で、核分裂できるほど十分に励起されたらどのような FP 分布となるのか？」と思って、決定論的核分裂の理論モデルとして、「選択チャンネル核分裂モデル（SCSM）」²⁵⁻²⁷⁾を提唱して、解析した。Pd や W に対する結果は、FP 分布のパターンが水野らの実験に“だまされたように”良く一致することがわかった²⁵⁾。また、同位体分布異常も解析結果と良く一致する。SCSM 理論を実験結果の確かな²³⁵U+n の核分裂 FP 分布の解析に適用したところ、ふた山の分布、微細構造、中性子エネルギー依存性について、実験値と良く一致した結果となった^{26,27)}。問題は、そのような核励起（集団励起による核の変形運動）がいかんにして可能かということである。ひとつの可能性は、4D 反応の 23.8MeV の α 粒子の Pd や W への吸収励起と核分裂である。8D 反応の 47.6MeV の⁸Be による吸収・励起もあるかもしれない。もう一つの可能性は、放電電解の陰極プラズマ条件が X 線レーザーの発生源条件に似ていることである。サブ MeV のバースト X 線による多光子吸収集団励起過程の可能性を検討している。これは、超強力レーザーによる X 線バーストで核分裂させるアイデア²⁵⁾につながる。

3. 凝集体内核融合の物理モデル

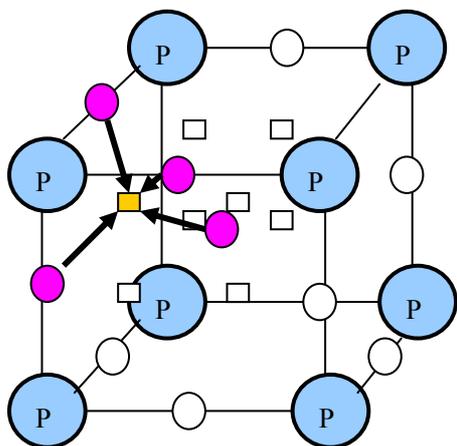
いわゆる常温核融合の理論モデルは、数多く提案されたが、欠陥の無いものはないといわれている²⁸⁾。「凝集体格子系の秩序が関与した核融合」のモデルについて、文献 12) に第一段階の初等的モデルを展開した。それによると、クラスター核融合（2D, 3D, 4D など）の反応率は、

$$\begin{aligned} \langle \text{クラスター核融合率} \rangle &= \langle \text{原子レベルのクラスター生成確率} \rangle \\ &\quad \times \langle \text{核クラスターの遮蔽ポテンシャル透過確率} \rangle \\ &\quad \times \langle \text{核内核融合率} \rangle \end{aligned} \quad (8)$$

と書ける。最初の項は、実験の物性的条件に左右されるので、一般化した答えを得るのが難しい。しかし、バリア透過率と核内核融合率は定式化が可能である。

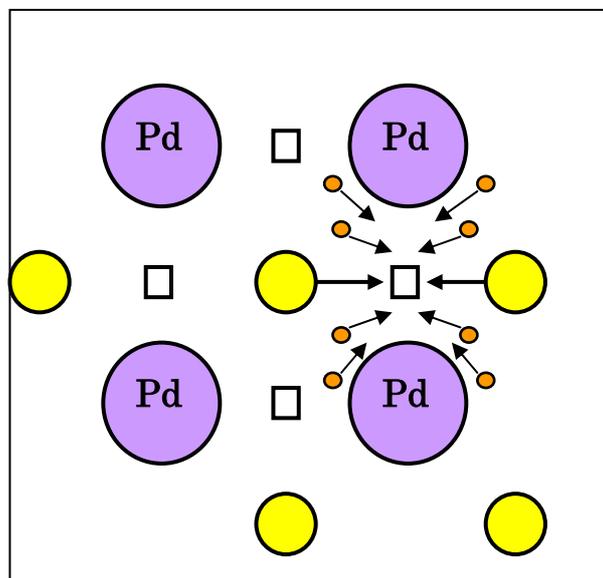
図-11 に PdDx 格子の場合の過渡的 D クラスター形成のケース例を示している。その二次元簡略図を図-12 に示す。

最近ロシアのノボシビルスク大の **Kirkinskii-Novikov** は、**図-12** の系について、Pd の 4d 最外殻電子 (Pd あたり 10 こ) と重陽子 (d^+) 2 この格子系での運動を、電子軌道変形ダイナミクスモデル (EODD) と名づけた、一種のモンテカルロ分子動力学計算によって解析した。



○ O-site
□ T-site

図-11 : 4D クラスター形成



● 重陽子
● 電子

図-12 : 二次元モデル

K-N の計算結果を**図-13** に示す。比較は次に述べる EQPET モデルである。

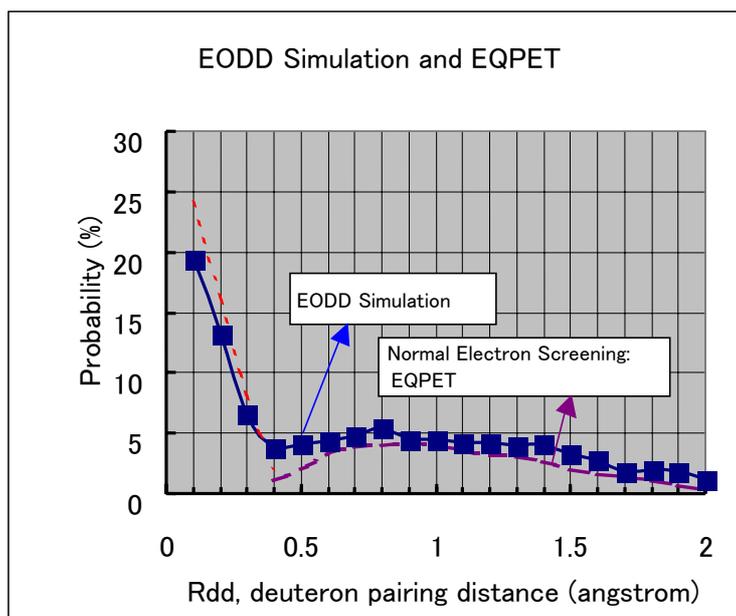


図-13 : 過渡的 dd ペアの近接、四角印 ; EODDsimulation²⁹⁾、破線は EQPETmodel³⁻⁵

K-Nによると、dd核間距離が0.1オングストローム以下となる過渡的なddペアの割合は18%となっている。これは、驚くほど大きな値である。普通電子はパウリ排他律の支配でトーマスフェルミガスとして存在する。そのため、 d^+2 個の接近では電子を一個つけて D_2^+ 分子イオン状態、かスピン逆向きの電子を二個つけて D_2 中性分子を過渡的に形成すると考えられる。 D_2^+ 分子のdd核間距離 R_{dd} は、1.1オングストローム、 D_2 のそれは0.7オングストロームであることが良く知られている。EODD計算には、 D_2^+ と D_2 に対応する分布(波動関数)が0.4オングストロームより上にちゃんと現れている。過渡的なボソニ化電子対 e^* の発生を仮定するEQPET理論³⁻⁵⁾では、 DDe^* 、 DDe^*e^* の過渡的な分子状態の波動関数が、 $R_{dd}<0.4$ オングストロームに分布している。

高橋のEQPET理論では、複数の重陽子と複数の電子からなる図-11に示したような過渡的なDクラスターの波動関数が、解の分かっている分子状態 D_2^+ 、 D_2 、 DDe^* 、 DDe^*e^* などの波動関数の線形結合で書けると仮定している。すると、クーロン遮蔽ポテンシャルのバリア透過率のガモフ積分は、各分子状態でのバリア透過率のガモフ積分の線形結合で近似できる。具体的な数式は文献3~5)を見ていただきたい。分子状態のバリア透過率と核融合率は計算できる。多体同時反応については、非常に早い二体反応のカスケードプロセスとして近似して、多体系のバリア透過率が荒い近似でもとまる。多体の強い相互作用については、fm領域の荷電パイオンレンジでの3D、4D、8Dの正多面体配置の時に共鳴的なS値の増大が考えられる^{3,12)}。計算結果を**表-1**に示す。

表-1: Barrier-Factors (BF) and Fusion-Rates (FR in f/s/cl), by transient quasi-particle screening

(m*/me, e*/e)	2D BF (FR)	3D BF (FR)	4D BF (FR)	8D BF (FR)
(1,1)	1E-125 (1E-137)	1E-187 (1E-193)	1E-250 (1E-252)	1E-500 (1E-499)
(2,1)	1E-53 (1E-65)	1E-80 (1E-86)	1E-106 (1E-108)	1E-212 (1E-211)
(2,2)	1E-7 (1E-20)	1E-11 (1E-17)	1E-15 (1E-17)	1E-30 (1E-29)
(4,4)	3E-4 (3E-16)	1E-5 (1E-11)	1E-7 (1E-9)	1E-14 (1E-13)
(4,4)b	4E-1 (4E-13)	2E-1 (2E-7)	1E-1 (1E-3)	2E-2 (2E-1)

ここで、(4,4)は2この過渡的クーパー対がペアリングした状態をしめす。

2D のバリア透過率は、電子一個で 10^{-125} である。過渡的クーパー対(2,2)一個で 2D のバリア透過率は 10^{-7} まで急上昇する。その時の dd ペアあたりの核融合率は、 10^{-20} f/s/pair で

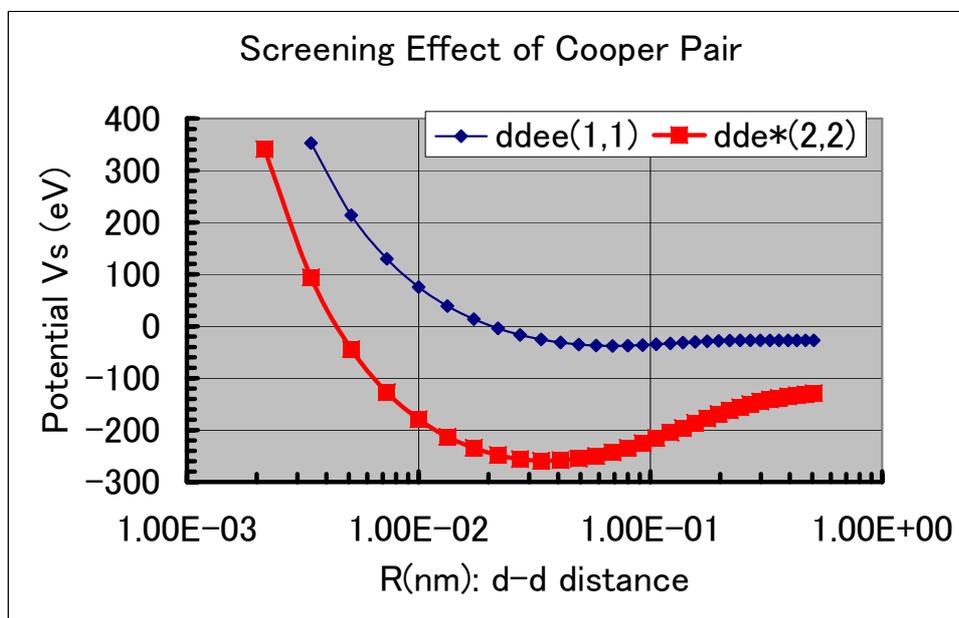


図-14 : D_2 分子のポテンシャルとクーパー対分子のポテンシャルの比較、
 $V_s=0$ の R から約 4 fm までのガモフ積分がバリア透過率を与える。

ある。これは、dd ペアのマクロ密度を 10^{22}cm^{-3} とすると、100f/s/cc の DD 核融合率にあたる。常温核融合実験で、たまに観測された弱いレベルの中性子発生は、この過渡的なクーパー対発生で説明できる。さらに、注目すべきは、過渡的なクーパー対の発生により、3D, 4D 反応率が 2D 反応率を追い越して「逆転している」ことである。「秩序ある核融合」では、この様な逆転が起こり得ることを示している。電子による遮蔽ポテンシャルを D_2 分子とクーパー対分子と比較して図-14 に示す。過渡的クーパー対分子では、dd は古典力学的に約 4 ピコメートルまで近づくことがわかる。一方 D_2 分子では、20pm である。

4. 今後の展開

10 年ほど研究して、なにか糸口が見えてきたと言うのが、現在の状況であろう。主な実験結果の繰り返しての確認、さらに新しい事実への挑戦が期待できる。理論的には、「この芋づるをたぐってみる」のが面白そうである。

2003 年 4 月より、原子力学会に、「サブ keV エネルギー領域での凝集系核現象」研究専門委員会がスタートした。これまでの研究状況を調査し、検証すべき研究の摘出、講演と議論、実験結果の検証・吟味、今後研究すべき項目の検討・リストアップ、今後の研究の進め方の議論、などを行っていく予定である。活動は二年間である。委員以外の

随時参加を歓迎している。

常温核融合の国際会議はまだ続いていて、2003年8月23日より1週間、ボストンのMIT近くのホテルでICC F10が開催される。

参考文献：

- 1) H. Ikegami: Evidence of enhanced non-thermal nuclear fusion, Bulletin of Institute of Chemistry, Uppsala University, 2002
- 2) H. Ikegami: Jpn. J. Appl. Phys., 40 (2001) pp.6092-6098
- 3) A. Takahashi: Deuteron cluster fusion in condensed matter, Selected Papers from ICCF9, 2003, to be published by Springer Verlag
- 4) A. Takahashi: Proc. JCF4, pp.74-78, 2002*
- 5) A. Takahashi, Y. Iwamura, S. Kuribayashi: Proc. JCF4, pp.79-81, 2002*
- 6) A. Takahashi: Drastic enhancement of tetrahedral and octahedral resonance fusion under transient condensation of deuterons at lattice focal points, Proc. ICCF9, May 2002, Beijing China, to be published by Springer Verlag
- 7) A. Takahashi, K. Maruta, K. Ochiai, H. Miyamaru: Phys. Letters A 255(1999)89-97
- 8) A. Takahashi, K. Maruta, K. Ochiai, H. Miyamaru, T. Iida: Fusion Technology, 34(1998) 256-270
- 9) M. Miyamoto, Y. Awa, N. Kubota, A. Taniike, Y. Furuyama, A. Kitamura: Proc. JCF4, pp.37-41, 2002*
- 10) 阿波靖晃、宮本雅史、久保田直義、谷池晃、古山雄一、北村晃：日本原子力学会「2003年春の年会」、予稿集 E7, 2003年3月
- 11) 笠木治郎太、結城秀行：日本物理学会誌、58(3), (2003) pp.190-194
- 12) 高橋亮人、沼田博雄、山田弘、岩村康弘、大森唯義、水野忠彦、秋本正：「固体内核反応研究 No.1」、工学社、1999年12月
- 13) J. Ziegler: The Stopping Range of Ions in Matter, Pergamon Press, New York, 1985
- 14) K. Ochiai, K. Maruta, H. Miyamaru, A. Takahashi: Fusion Technology, 36(1999)315-323
- 15) T. Dairaku, Y. Katayama, T. Hayashi, Y. Isobe, A. Takahashi: Proc. ICCF9, May 2002, Beijing China, to be published by Springer Verlag
- 16) Y. Isobe, S. Uneme, K. Yabuta, H. Mori, T. Omote, S. Ueda, K. Ochiai, H. Miyamaru, A. Takahashi: Proc. ICCF8, Conf. Vol.70, Italian Physical Society, (2001)pp.17-22
- 17) M.H. Miles, B. F. Bush: Proc. ICCF2, Nagoya, Universal Acad. Press (1992)pp.189-200
- 18) Y. Arata, Y. Zhang: J. High Temp. Soc., Japan, 23, Special Issue (1997)
- 19) Y. Arata, Y. Zhang: Jpn. J. Appl. Phys., 37(1998)pp.L1274-L1276
- 20) Y. Isobe, S. Uneme, K. Yabuta, Y. Katayama, H. Mori, T. Omote, S. Ueda, K. Ochiai, H.

- Miyamaru, A. Takahashi: Jpn. J. Appl. Phys., 41(2002)1546-1556
- 21) Y. Iwamura, T. Itoh, M. Sakano, S. Sakai: Jpn. J. Appl. Phys., 41(2002)4642-4650
 - 22) T. Mizuno, T. Ohmori, K. Kurokawa, T. Akimoto, M. Kitaichi, K. Inoda, K. Azumi, S. Shimokawa, M. Enyo: Denkkagaku 64(1996)1160
 - 23) T. Ohmori, T. Mizuno, Y. Nodasaka, M. Enyo: Fusion Technology, 33(1998)476
 - 24) G. Miley, J. Patterson: J. New Energy, 1(1996)5
 - 25) A. Takahashi, M. Ohta, T. Mizuno: Jpn. J. Appl. Phys., 40(2001)7031-7046
 - 26) M. Ohta, A. Takahashi: Jpn. J. Appl. Phys., 40(2001)7047-7-51
 - 27) M. Ohta, A. Takahashi: Jpn. J. Appl. Phys., 42(2003)645-649
 - 28) V. A. Chechin, V. A. Tsarev, M. Rabinowitz, Y. E. Kim: Int. J. Theor. Phys., 33(1994)617-670
 - 29) V. Kirkinskii, Y. Novokov: "Theoretical Modeling of Cold Fusion", Novosibirisk University Press (2002)

*Proceedings of JCF4 is available at;

- <http://www.eng.osaka-u.ac.jp/nuc/03/nuc03web/JCF/>