

## 第 14 回凝集系核科学国際会議 (ICCF14) 報告

神戸大学大学院海事科学研究科 北村 晃

### はじめに

第 14 回凝集系核科学国際会議 ICCF14 が去る 8 月 11-15 日 Washington DC で開催された。口頭発表は約 60 件、ポスタ発表は約 40 件であったが、登録参加者は前 3 回( ICCF11(Marseille), 12(Yokohama), 13(Sochi) ) に比して約 2 倍の約 180 名 (日本人は 15 名) と、活況であった。米国では関心を持つ人が潜在的に多いということであろう。

会場のホテルは Union Station と US Capitol - National Mall の中間に位置し、位置的には絶好であったが、あいにく改装工事中で、外観の悪さのみならずエレベータの運行制限などにより不便を強いられた。そのこともあって、恒例の水曜日午後の excursion は余計に楽しめた。Dulles 国際空港近くに近年新築された Udvar-Hazy 航空宇宙博物館で、ごく初期の実験段階の飛行機から、Concorde、スペースシャトル Enterprise まで興味深く見学できた。

本稿ではまず会議議長 Nagel の現状要約を紹介したあと、発熱実験の最新動向を紹介する。電気分解方式の中でも Codeposition 方式と Super wave 方式、そして高圧ガス吸蔵方式 (Arata セル) が注目される。次に、核変換現象及び核反応生成粒子を検出する実験的研究の最新動向を紹介する。一般的な電気分解や放電における反応生成物測定に続いて、多層膜ガス透過核変換、そしてビーム注入方式による凝集系核反応の基礎的実験について述べる。理論の発表はごく簡単に止める。

なお、[#]はアブストラクトファイル (<http://lenr-canr.org/Collections/ICCF14Abstracts.pdf>) に示されている講演番号である。

### Nagel による CMNS 研究の現状要約

冒頭挨拶の後、Nagel が CMNS 研究の現状認識を示した[2]。Fleischmann-Pons 効果 (FPE) は現実であり再現性が徐々に上がってきているが、制御性と研究資金が不足で、情報交換の活発化が必要である。問題は信頼性のある材料の開発で、ナノテクがキーテクノロジーであることを述べた。また、応用の問題としては、低温では適用し難い在来の発電技術のみならず、熱電材料などの開発も視野に入れる必要性を示唆した。

そして、今回の ICCF14 で行われるであろう発表を次のように分類し、独自の観点から論点をまとめている。

- Q1. 過剰エンタルピーはあるか? : Codeposition( Phusor; Swartz [5] ) Super wave( Dardik-Lesin [6] ) 高圧ガス吸蔵 ( Arata セル; Arata-Zhang [19] ); Arata セッションと Szpak セッション
- Q2. 熱出力と入力との相関は? : 重要パラメータ ; D/Pd, D flux/current, 今回ナノ構造クローズアップ
- Q3. 熱は核的現象の帰結か? : 電子ビーム照射 PdD<sub>x</sub>/TiD<sub>x</sub> からの高 E 陽子・α粒子 ( CR-39; Lipson [21] ) 重水素グロー放電からの X 線・荷電粒子 ( SBD; Storms-Scanlan [22] ) 電気分解体系における高 E 粒子検出 ( CR-39; Oriani [23] ) Co-deposition 体系での高 E 粒子検

出 ( CR-39; Forsely-MosierBoss [20,61] ), Iwamura 型 D 透過薄膜からの荷電粒子放出 ( Toriyabe [25] )

- Q4. 核反応生成物と熱との相関は? : 副産物 He と発熱 / 過剰熱 (EH) の定量的関係は?、非熱的赤外光放射 ( Swartz [55] )
- Q5. それ以外の核的現象は? : Iwamura [27], Yamaguchi [28], Hioki [29], Dash [73], Savvatimova [93]などの核変換
- Q6. 核的素過程は何か? : 凝集体中での核反応への大きな電子効果は EH と関係するか?
- Q7. 将来は? : 理論の見直し、材料特性の制御、ガス方式の重要性、計測方法、応用の摸索

#### 発熱実験：電気分解方式

まず Swartz (JET Energy Inc.)[5]は Phusor と称する電気分解装置等での今までの研究成果を総括した。低出力 ( 1W レベル ) では利得 230% を 5 日間持続したこと、Pd/D<sub>2</sub>O/Pt のみならず Ni/H<sub>2</sub>O/Pt 系でも過剰出力 ( EP ) を観測したこと、そして Codeposition 型 Phusor ( Pd/Pd(OH)<sub>2</sub>/Pt ) で短時間ではあるが 800% の、また低利得短時間ではあるが 100W レベルの EP を報告した。

Lesin (Energetics Technologies)[6]は 30kHz-60W の超音波 ( US ) で励起した陰極を用いた Super wave 電解を報告した。10mA/cm<sup>2</sup> 程度の低電流密度電解で高い吸蔵率 D/Pd~0.95 が達成されること、そして最良のデータとして 32W(COP=3000%)、40 日、3.5MJ の EH、25keV/atom-Pd(D) を得たことを述べるとともに、US 励起により電極表面にサブミクロンのピットができることを報告した。

Violante (ENEA Frascati) [12]は結晶面と EH の関係を調べ、<100>方向が最も高効率で、結晶構造を壊さないために電気分解動作初期の D 充填時期には低電流動作が必要としている。

Codeposition の発明者 Szpak を称えるセッションで Mosier-Boss (SPAWER Sys.) [20]が Codeposition の実験結果をレビューした。0.3W×1.5E5s=45kJ レベルの再現性ある発熱や、陰極の赤外線イメージで Joule 加熱では説明できないホットスポットが観測されること、10keV-MeV の X 線とトリチウム生成、微視的表面形態の変化 ( 樹木状、フラクタル、... )、そして、使用後陰極材料中に Mg, Al, Si, Ca, Cr, Fe, Ni, Zn 等の存在が認められていることを報告した。

以上のように、Codeposition にしろ US 励起にしろナノ領域の表面構造が問題となっている。表面ナノ構造を造るための手段として、Marwan (Dr. Marwan Chemie) [14]は界面活性剤を利用した方法を提案・作製し、SEM の観測結果とともに電気化学的性質を紹介した。今後の方向性を示すものとして注目すべきである。

#### 発熱実験：高圧ガスローディング方式

Biberian (U. d'Aix Marseille) [16]は、温度・圧力の設定・制御が容易な上に清浄表面を保ち易く、多様な計測手段と応用可能性を提供できるガスローディング方式をレビューした。

Celani (INFN-LNF) [17]は 14mg-Pd ナノ粒子をコーティングした 50μm-Pd 細線を 5atm-D<sub>2</sub> 中で 50kA/cm<sup>2</sup> の電流密度で加熱する独自の体系を用いて、超高速 ( ~10s ) ローディングにより

400W/g-Pd の過剰出力 (EP) を得たと報告した。

Arata (Osaka U.)らは従来から、Pd 粉末を Pd 容器に入れた二重構造 (DS) 陰極での重水電気分解、そしてそれを発展させた高压ガス導入方式で EH と  $^4\text{He}$  生成を主張していたが、昨年末、重水素フィルタとして働いていた Pd 容器と Pd 粉末 (Pd/ZrO<sub>2</sub>) を分離し、さらに簡便化した実験装置と結果を発表した[Y. Arata, et al., J. High Temp. Soc. No.1 (08)]。発熱が起こる Pd 粉末の部分だけを見ると入力ゼロであり、極めて純粋な測定が可能となっている。この体系で、EH (D<sub>2</sub> 吸収時と H<sub>2</sub> 吸収時における発熱量の違い) と Pd 粉末に残存した  $^4\text{He}$  の存在を明確に示し、核反応起源であることを結論した。この実験は去る 5 月に公開実験としても行われて注目され、今回 ICCF14 でも Arata を称える特別セッションで発表された[19]。今回はさらに PdZrNi+D<sub>2</sub>、PdZrNi+H<sub>2</sub> 系の結果も示した。

極めて重要な現象であるだけに、多くの機関で追試が行われていると思われ、筆者(Kobe U.)らのグループからも、その着手とプレリミナリーではあるがネガティブではない実験結果を発表した[15]。室温で PdD<sub>x</sub> (x~0.85) という高い D/Pd が得られたことと、D 吸収時の発熱量と H 吸収時の発熱量の差異を議論した。

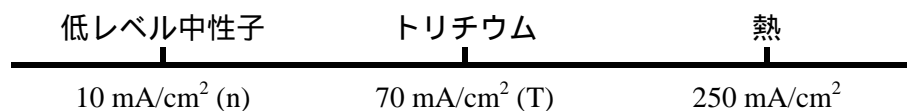
Tschiya (Tokyo National College of Technol.) [54]は D/H 吸蔵した Pd における核反応の生起を Raman スペクトルの変化から検知しようという試みを発表した。未だポジティブな結果を得るには至っていないが、外部から非接触に診断できるという利点があるので今後の実験が期待される。

#### 電気分解実験における放射線検出と核変換生成物測定

今までの電気分解実験における代表的な放射線検出 / 核反応生成物測定事例を Hagelstein は下記のようにまとめている[38]。

- T 検出 : T.N. Claytor *et al.*, ICCF7 (98), M. McKubre, ICCF11 (04)
- T と n の検出は無相関 : K. Wolf *et al.*, J. Fusion E. 9(90)105
- $^4\text{He}$  検出 : M. McKubre, ICCF11 (04)
- $^4\text{He}$  と EH の相関 : M. Apicella *et al.*, ICCF12 (05)
- 高エネルギー (8-14-MeV)  $\alpha$  粒子測定 : A. Lipson *et al.*, ICCF10 (03)

そして、電流密度の大きさと出力 (熱 / 放射線) に相関があり、電気分解の動作領域を下図のように 3 領域に分けることができるとしている。



これは Codeposition 型 Phusor[5]を含む電気分解装置での観測結果によるものであり、“3-Region Hypothesis (3RH)”と称している[42]。しかしもちろん一般的には上記の領域分類に属さない実験結果も多数存在する。今回の ICCF14 では核変換 / 核反応に関して(4-2)に述べる薄膜透過型核変換実験の他、次のような測定結果が報告されている。

Karabut (FSUE “LUCH”, Moscow Tech. U.)は[60]において、高压放電電解における 100W-300% オーダの EP を報告したほか、大電流グロー放電における X 線測定の結果[65]も提

示した。1-3keV の X 線 ( 1E8 photons ) が放電中のみならず、電流 off 後にも観測されるという。Stringham (First Gate Energies) [57]は超音波バブル核融合を報告した。また、Lipson (A. N. Frumkin Inst. of Phys. Chem.) [21]は PdD<sub>x</sub> ターゲットへの電子ビーム照射により、10-19MeV の α 粒子が 1E-2/s·cm<sup>2</sup> のフルエンス率で観測されたことを報告した。Storms-Scanlan (Kiva Labs) [22]は Pd + mixed oxides (CeO<sub>2</sub>, CaO, ZrO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) という陰極を用いた重水素グロー放電からの X 線放出を、Oriani (U. Minnesota) [23]は電気分解体系におけるバックグラウンドの 100 倍の高 E 粒子検出 ( CR-39 ) を、そして MosierBoss-Forsely (SPAWER Inc., JWK Tech. Corp.) [20,61] は Co-deposition 体系で CR-39 によって “ triple track ” を観測したと報告した。また Mizuno (Hokkaido U.) [59]はフェナントレンの水素ガス中での加熱により 1W/cm<sup>2</sup> オーダの EP 及び γ 線を観測したと報告した。

他方、Kornilova (Moskow State U.)ら[56]はキャピテーションチェンバにおける X 線放出を数年前に観測していた。これに関して今回、衝撃波による器壁表面原子の励起・脱励起に伴う X 線放出と、その物理機構を同定した。CF/CMNS の観点からはネガティブな結論であるが、「異常」現象の定量的考察による説明という意味で評価に値する。

#### 薄膜透過型核変換実験

CaO/Pd の多重層薄膜表面に Cs や Sr, Ba などをつけておいて背面を真空排気しながら表面を D<sub>2</sub> ガスに曝す ( D を透過させる ) と  $^{133}_{55}\text{Cs} \rightarrow ^{141}_{59}\text{Pr}$ 、 $^{88}_{38}\text{Sr} \rightarrow ^{96}_{42}\text{Mo}$ 、 $^{138}_{56}\text{Ba} \rightarrow ^{150}_{62}\text{Sm}$  の核変換が起こるといふ Iwamura ら(三菱重工;MHI)が見出した現象は、注目すべきその規則性の故に高い関心を集め、世界的に多くの追試が行われている。今回 ICCF14 では、“Transmutation” のセッションで MHI、神戸大とトヨタ中研、そして“challenges”のセッションで東北大学が最近の実験結果を発表している。

Iwamura (MHI) [27]は、今回 XRF において現れた未知ピークを E スキャン XRF 法により Ti と同定し、その成因を Ca→Ti と推定している。また、変換原子数増加を目的として、温度勾配による D 密度増加を試みていることを報告した。

Yamaguchi (Kobe U.) [28]は、ガス透過中その場で非破壊元素分析 ( PIXE ) をするために重水素流れ方向を逆にした試料体系を構築した。8 試料の試行のうち 2 試料で一見 “ positive ” な結果を得たが、過去に XPS で観測された Sr→Mo の変換 [Proc. ICCF12, p.272] を再確認できたとは必ずしも言えない。スペクトルピーク同定の信頼度が十分でなく、さらなる追及が必要である。試料表面清浄化、D 透過流量の増加と変換原子個数の増加が課題である。

Hioki (Toyota Central R&D Lab.) [29]は、MHI 試料と同じ CaO/Pd 多重層構造に 65keV-Sr<sup>+</sup> イオン注入により Sr を導入した試料で、Sr→Mo の変換を試みている。D 透過中流量が減少することを不純物 S の表面への偏析に帰し、大気中アニーリングすることにより予め表面の S を酸化物として除去した結果、Mo への変換が観測できたとしている。なお、大気中アニーリングにより Pd 表面には酸化物層ができるが、D 透過により還元されるという。さらに TOF-SIMS で、注入分布に対応する深部に <sup>96</sup>X が観測されている。X は Mo 以外に Ca<sub>2</sub>O や GaAl などの可能性もあり、さらなる検討が必要としている。

Toriyabe (Tohoku U.) [25]は、同様の試料から放出される荷電粒子の測定を試みている。高圧

ガス中での使用となるため Si 表面障壁型検出器に替えて YAP(Ce)を使用し、波形弁別により BG 事象を排除した。MHI および岩手大山田らにより提供された試料を用いて、最大 0.5sccm の流量で  $D_2$  透過させた時、7.0-9.5MeV の領域に BG との違いを観測した。計数率は反応率に換算すると  $6.8E-3$  f/s/cc であった。

以上のように、複数の機関において核変換の証拠となる実験事実が積み上げられつつある。

### 低エネルギービーム-ターゲット核反応実験

そもそも常温核融合あるいは凝集系核科学(CMNS)の分野における物理的最大の関心事は、過剰熱または発熱が核反応起源のものであるとすれば、いかなる物理機構が働いて MeV 規模のクーロン障壁が克服されているかということである。固体中では電子によって原子核電場はある程度遮蔽される。この効果を従来から研究しているのが、東北大学笠木グループや Rolfs のグループ(U. Bochum)、そして Czernski (University of Szczecin)・Huke (Technische Universitaet Berlin)のグループである。

原子核電場の遮蔽はその周りの電子の存在によってその Debye 長程度の領域全体があるポテンシャル  $U_s$  だけ下がると考えて、反応断面積における入射粒子のエネルギー  $E$  を実効エネルギー  $(E+U_s)$  に置き換えて取り扱うのが通例である。従来上記のグループは、金属等をターゲットとして重水素をイオン注入し、重水素(過)飽和状態になったターゲットからの  $d(d,p)t / d(d,n)\alpha$  反応生成荷電粒子を測定して、断面積のエネルギー依存性を数-数 10keV のエネルギー範囲で測定してきた。そのエネルギー依存性を、孤立した  $D_2$  ガスターゲットを用いて測定されている在来の断面積と比較することにより、 $U_s$  を求めている。数 10 種類の金属中での  $d(d,p)t / d(d,n)\alpha$  反応について  $U_s$  の実測データを蓄積してきたが、半数以上の金属で、電子による遮蔽だけでは説明困難な 300-800eV に及ぶ "anomalous" に大きい  $U_s$  が観測されている。断面積では 40 倍の "enhancement" であるという。

Kasagi [43]は、今回融点付近の温度での  ${}^6\text{Li}(d,2\alpha)$ ,  ${}^7\text{Li}(p,2\alpha)$  にも対象を拡大し、固体のとき  $U_s=350\text{eV}$  であるが液体に相変化すると  $U_s=850\text{eV}$  にもなることを見出している。そしてこれがイオンによる古典的 Debye 遮蔽によるもので、固体の場合でもこのイオン効果が大きいのではないかと推論している。

Huke [44]は、10keV 以下で  $d(d,p)t / d(d,n)\alpha$  分岐比や放出角度分布が変化している兆候を指摘すると共に、清浄真空の必要性を実証した。

そして同グループの Czernski [45]は注目すべき発表を行った。厚さ 0.1mm の Pd 薄膜に  $D_2$  ガス 4atm の差圧をかけた時、真空側に置いた荷電粒子検出器で 5MeV 付近にピークをもち 0.5MeV 程度の半値幅をもつスペクトルを得た。放射性物質の汚染の可能性を否定はしていないが、統計的にかなり有意な荷電粒子スペクトルであるとしている。

また、同じく Czernski [45]は、 $d(d,n){}^3\text{He}$  や  $d(dp)t$  ブランチに対して  $d(d,{}^4\text{He})$  ブランチが優位になる機構に対する仮説として、"D-D threshold resonance" 説を提唱している。高密度に重水素充填された Pd 格子中サイトで  $D_2$  分子になっている二つの D に三番目の D が接近した時、 $D+D_2 \rightarrow {}^4\text{He}+D$  反応が起こり、生成粒子  ${}^4\text{He}$  と D がそれぞれ 8MeV と 16MeV で放出される、というものである。 $D_2$  分子軌道と  ${}^4\text{He}$  の励起準位  $0^+$  が接近しているため共鳴的遷移が可能と

している。

## 理論

理論のセッションは木曜日であり、Hagelstein (MIT)[38]、Li (Tsinghua U.)[39]、Kim (Purdue U.)[40]、Chubb, S. R. (Infinite Energy Magazine)[41]、Takahashi (Technova Inc.)[47]らの常連を含む 11 件の口頭発表、そしてポスタ発表にも同数程度の理論的研究があった。しかしそれらの中には、定量的議論が十分でなかったり、仮説として述べるに留まっているものや、前回までの発表からの進展が十分でないものが多かったように思われる。そんな中でほとんど唯一 Takahashi [47]は 4D/TSC における電子雲の時間的振る舞いに関する定量的考察を進展させている。

日本からの発表は上記の他は、Kozima (Cold fus. Res. Lab.)の 2 件[92][93]のみであった。後者では、近年発表されたケーブルの絶縁体中での予期されない元素の存在[kumazawa, T., et al.; Electrical Engineering in Japan 153, (05), 1]、及び Mizino [59]の実験結果を、氏独自の “neutron drop”の吸収により説明しようとしている。

## おわりに

以上のように、実験手法によっては未だに混沌とした状態に留まっている分野もある一方で、ある種の実験手法の分野においては、“anomalous”な核反応の証拠となる実験事実が系統的に蓄積されると共に、凝集系核現象に関する理解が深まりつつあるといえよう。

ソサエティの問題としては、学生参加者が 3 名の日本人のみであった（と思われる）ことに象徴されるように、高齢化が大きな問題である。その解消は着実にサイエンスとしてこの分野を育成することと表裏一体の問題である。