

理想的な核エネルギー利用システムを求めて*

古川 和男**

<核エネルギーとの関わり>

大学二年生でしたが、著者は Seaborg らの研究公開にもとづいてアクチノイド化学について日本初の総説を纏めました¹⁾。

卒業後、東北大・金研で金属精錬技術の基礎として「無機液体構造化学」の研究に励みました。その間ビキニ事件での署名運動では、体を張って仙台市民と語り合い、「原水爆は、人殺し兵器としてのみでなく、核エネルギー平和利用を阻害するから二重の悪」とのパンフレットを纏め、伊達たまき氏（御茶ノ水の化学出身、平和・児童問題に生涯をささげられた）の勧めで「第1回原水爆禁止世界大会」で発表し、大きな反響があった。

こんな中、竹内栄教授と共に「原子力講座」の発足に努力し、東北大最初のその講座が発足すると私はお願いして同じ研究室の桐原朝夫氏が残された Ti 熔融塩電解の実績を生かし、金属トリウム製造の研究を始めました。これで皆さんと共に大いに成果を挙げたと思います。

その際、新講座開設費の半分が私共の構想した X 線液体構造解析装置費（200 万円）に使われたのです。この新構想は、オークリッジ研とボン大学と私共の三者がほぼ同時に思いついたこととなります。これで、私の液体構造研究は大きく進展し、その後の熔融塩炉開発に大きな力となりました。

<核エネルギーの合理的な利用形態>

原子核化学反応エネルギー獲得には「核分裂」が圧倒的に有利です。よく「核融合」が話題になりますが、まだその基礎の量子電磁気理論がないのです。だから、ITER のような実寸大の物理実験

装置を欲しがるといふ敢えて言えば、何処にどんな山が在るかも判っていないのに、それに植える木の研究をしている様なものです。しかし、**DT 核融合**は戦後秘密裡に Pu 生産用に取上げられたもので、本来「中性子獲得」即ち核分裂性物質作りには役立つかも知れません。筆者もそれにはかなりの研究努力をしました（後述）。

現在の核分裂原発（原子核エネルギー利用発電所）は皆、**固体核燃料**を使っています。これは重大な間違いと言えるでしょう。世界最初の核分裂連鎖反応炉が Fermi の指導で臨界になったのは、もう六十年前の 1942 年 12 月 2 日です。その実験に最若年で参加した Dr. A. Weinberg の手記によると、翌年から隔週に“New Pile”セミナーが催されています。ここで、Fermi, E. Wigner, L. Szirard などの超一流学者に若者達が加わって、将来の核エネルギー利用工学装置の可能性が自由に討論されました。次第に二人の Nobel 賞学者 Wigner と Harold Urey（著名な同位体化学者）が指導的存在になりましたが、結論は「エネルギー生産工学装置としての“核分裂連鎖反応炉”は、基本的に**機械工学的装置**というよりも**化学工学的装置**とみなすべき」で、「**核燃料体は液体が好ましい**」となっていたのです。（1941 年には Cambridge 大学での討論会でも、液体金属ビスマスなどに溶かした液体核燃料体が好ましい、という提案がなされていました。）

酸水素反応熱が 3eV なのに核分裂は 200MeV であるが、いくら核燃料物質の変化量が僅かでも、核反応炉も本質は核化学反応エネルギーを使う「**化学工学プラント**」です。そうならば、作業媒体は**固体**（反応速度または化学処理速度が遅い）

* 第 143 回京都化学者クラブ例会（2002 年 5 月 11 日）講演

** トリウム熔融塩国際フォーラム

や気体（大容量かつ高圧になる）よりも液体が好ましいのは自明です。

また今の原発は皆、U ないし Pu を含む燃料を使っていますが、Pu はガンマ線の弱い新人工元素で、容易に化学分離して核兵器が作られ、監視・検知・防護が極めて困難だからテロ利用にも最適です。今こそ、軍事に不向きな Th 利用を再検討すべき最後の機会と思われる。

何故ならば、今世紀末までには、増大するエネルギー使用量からいって太陽起源のエネルギー技術が基幹エネルギー技術に取って代わらねばならないと思うからです。ただしそれまでの中間を核分裂エネルギーで産めるべきです、環境対策からも。

<理想的な核エネルギーの利用形態>

液体核燃料: 固体の核燃料体での (a) 中性子などによる照射損傷, (b) 冷却困難, (c) 微量不純物でも物性変化変質, などの弱点のない液体を利用すべきでそれが**熔融塩**です。熔融塩は「安定なイオンからなる液体」で無色透明で常圧の、水のようにさらさらした液体です。中性子との反応が少なくして良い溶媒となる ${}^7\text{LiF}\text{-BeF}_2$ 二元系熔融塩に、核反応物質の弗化物を溶解して核燃料とします。

一切の照射損傷を受けず、空気・水との化学反応の心配がなく、 500°C 以下では丈夫なガラス状に固化し漏れても安全です。この中で核反応を起させ、**熱輸送・冷却**、さらに**化学処理機能**の三者総てを果させます。それに依ってこそ、超高度の総合機能を発揮しつつも、最高度に単純な炉構造が実現し、安全・経済性が充分な理想的原発が実現できるのです。

トリウム核燃料サイクルへ: 今までの原発は皆 U 資源利用です。天然にある核分裂性物質は ${}^{235}\text{U}$ のみだから初期には当然ですが、生れる Pu が大問題です。

トリウムであれば、U と違い資源は豊富で偏在せず、これに中性子一個を加え新しい核分裂性

${}^{233}\text{U}$ に変換すれば、遥かに性能のよい新 Th-U 核燃料増殖サイクルが実現できます。特に重要なのは、常に副生する ${}^{232}\text{U}$ が異例に強いガンマ線（鉛 20cm でも防げない）を伴い、**軍用・テロ用に不適**になる事（液体核燃料ならば問題ない）です。さらに Pu は作らず、逆にこの炉にそれを入れれば、完全有効に消滅できます。正に、平和利用に最適な核燃料サイクルです。

小型熔融塩炉へ: 上述の熔融塩核燃料を使用し増殖発電炉を目指した開発計画が、Weinberg をリーダーとする米国オークリッジ国立研究所 (ORNL) で 1947-1976 年頃熱心に進められ、多大の成果が得られました。しかしこれには幾つか欠点がありましたが、我々はそれらの欠点を排除し、炉構造・運転保守が単純な **16 万 KW 小型熔融塩炉** の設計に成功しました。しかも「**核燃料自給自足型**」に出来、数ヶ月に一度の Th 塩添加以外に、核燃料は殆ど添加不要で小型にでき発電所としては理想的です。**FUJI** (不二) と名づけました。

事故時に放出され易く危険な気体核分裂生成物のクリプトン・キセノンは、常時除去するので、事故時の放出が殆ど無くなります。核燃料塩が漏れても、常圧で空気・水と反応せず、ただ受け皿で受けてタンクに導けばよい。炉内の燃料が無くなれば炉が停止するのは当然で、**臨界事故や炉心熔融**などの重大事故は考えられない。

炉の内部構造は実に単純で、裸の黒鉛が 90% の空間を占め、熔融塩が隙間を流れる。他の物質はなく、炉容器は開閉不要です。核燃料塩の循環する一次系全体は融点 500°C 以上に保った高温室内に納めてあり、炉体や機器は皆裸同然で単純で、点検や修理は全て遠隔操作で行われます。チェルノブイリのような重大事故は決して起さず、恐らく**軍事・テロ攻撃**に対しても最も安全と思われる。

技術の基礎は、30 年前に米国で実験炉が 4 年間事故皆無の運転成果を挙げ、充分整っています。この実験炉に近い七千 KW **初電実験炉 FUJI** を七

年後に完成させ、基礎技術確認と人員養成を終え、次いで約12年後に約16万KWの小型熔融塩原発FUJIを完成させたい。資金は僅かで済みます。

＜開発の長期世界戦略：トリウム熔融塩核エネルギー協働システムの完成＞

そもそも発電所（原発）は公共施設的で安全単純かつ規模自由でなければならぬが、増殖炉は中性子不足から無理をして大型複雑となり、しかも性能不足です。増殖発電炉はあきらめて発電所（公共施設）はFUJIのように単純に留め、増殖機能は別施設（工場）との協働で果すことです。それには、「核スプレーション反応装置」を利用します。

その概要は拙著「原発」革命（文春新書）第八章または2002年7月号の日本物理学会誌を参照願いたいのですが、原理は単純です。約十億 eV（1000MeV）に加速した陽子を重い原子核に衝突させ、発生する多量の中性子で核燃料増殖します。局所的核反応個所に集中する核的・熱的・化学的諸難題に対処するため、我々は高濃度の Th 含有 ${}^7\text{LiF}\text{-BeF}_2$ 系熔融塩でターゲット／ブランケットを兼用させ、内部に一切構造物を置きません。これが加速器熔融塩増殖施設 AMSB（1890 年発明、5 カ国特許）です。原研時代に塚田甲子男と中原康明氏、後年にはベラルース Sosny 核研究センターに多大の協力をえました。将来は、前述のように DT 核融合利用の可能性もあります。それにも ${}^7\text{LiF}\text{-BeF}_2$ 系熔融塩ブランケットが最適で、米国 LLNL の仲間と種々の検討を行いました。まだ基本的技術基盤が立ち遅れています。具体的には、直径約 4mm の熔融塩タンクの上部に渦を形成させ、偏心した位置に陽子を入れ入射すればよく、大電流陽子加速器を 20 年後に実用化できればよい。

初期には解体核兵器および使用済燃料からの Pu を初期核燃料として、FUJI および AMSB で有効に燃やしつつ消滅させ、同時に U233 を生産し

て、徐々に 20～40 年かけて経済的な Th 増殖サイクルに円滑に移行させる技術シナリオが整いました。初期には、既存の大型軽水原発に対し小型 FUJI は棲み分けしつつ共存できます。

Pu を始末した後の本格時代には、AMSB からターゲット塩を汲み出し、少し組成調整すれば FUJI 系原発燃料塩として使えます。原発炉寿命終了後には、世界の二、三十個所に作った地域センター（AMSB、化学処理工場、核廃棄物処理工場などを集中管理）に燃料塩・炉本体を持ち帰り、リサイクルさせます。「加速器を備えた燃料増殖化学処理施設（地域センター）」と「発電所」とを分離させた上で世界に展開しつつ、全体として核燃料増殖サイクルを構築させるのです。これを「トリウム熔融塩核エネルギー協働システム構想（Thorium Molten-Salt Nuclear Energy Synergetics : THORIMS-NES）」と名づけました。

全システムを一種類の ${}^7\text{LiF}\text{-BeF}_2$ 系弗化物熔融塩燃料が循環していますが、生成放射性物質もできるだけ塩中に留めて循環させ、放射壊変および熱中性子または高速中性子反応で次第に消滅させます。化学処理操作は最小限に抑えますので、発生する低レベル核廃棄物は激減するでしょう。核廃棄物問題では、超ウラン元素が生産されないのも決定的な利点です。

また、核エネルギーから再生型太陽エネルギー体系への交代期（2070 年以降）には、核燃料（即ち中性子）が余るので核廃棄物の消滅にその中性子は無償で積極的に利用できます。それには AMSB も大いに役立ちます。貯蔵していた過去の使用済み固体核燃料からの核廃棄物処分も、容易に引受けられます。このようにして、核廃棄物の「万年問題」の大部分は「百年問題」に還元、解決できるでしょう。これで太陽エネルギー時代が安心して迎えられる。より詳細な技術内容評価は、拙著「原発」革命（文春新書）を参照願います。

<国内外の反響および国際協力について>

国内では、まず西堀栄三郎先生が先頭に立ってご尽力くださり、1981年には「トリウム・エネルギー学術委員会」が茅誠司会長、西堀・伏見・武田・石野・斎藤先生などが副会長で発足しました。驚いたのは、自民党超派閥のトリウム推進議員懇話会（百名、二階堂会長）の発足でした。経団連は学術委員会発足を支持しようとしたのですが、電事連の妨害を受け、さらに茅先生の依頼で土光敏夫氏が動こうとしたが行革臨調の委員長に推されて挫折しました。ただ科技厅が、熔融塩炉技術調査費を出してくれたので、カナダ・米・仏・スイス等海外調査と国内の技術調査を行うことが出来ました。

フランスからは、仏電力庁 (EdF) 研究開発本部長 Dr. Bienvenu および MSBR 開発部長 Dr. Lecocq が、我々の構想に深い関心支持を表明し、多大な激励協力をえました。

旧ソ連では、海外情報誌“Atomic Energy Abroad”が AMSB 論文を、日本の核エネルギー論文では最初のものとして掲載しました。1983年の国際会議 (Helsinki) で Kurchatov 研 (KI) の Dr. Novikov の尽力と知りましたが、彼から熔融塩炉協働開発提案をうけ、Alexandrov KI 所長 (科学アカデミー総裁) の了解済みといわれたが、フランスの友人より米国の協力が困難になるとの助言で断念しました。三年後の Chernobyl 大災害の直前に Dr. Legasov (KI 副所長) が熔融塩炉建設許可を得たが、彼は災害対策担当にされ、1988年の災害2周年記念日前夜に自殺し、計画は消滅しました。1983年にも充分実態があったのです。

同じ頃の 1987 年末にはフランスで高速増殖炉 Superphenix が完成しましたが、仏電力庁 (EdF) は「二号機を作れば破産。古川案を検討したい。」と、総裁より松前重義東海大総長へ親書が送られ、翌年 EdF・Clamart 研究所で「開発計画書」を共同作成しましたが、仏原子力庁が巻返し実を結びませんでした。だが 1998 年には Superphenix 廃棄決

定されました。我々は 10 年以上、時代に先行していたわけです。

1991 年頃からは旧ソ連の理論実験物理学研 (ITEP) や、Belarus の Sosny 科学センターとの共同研究も始まりました。さらに旧ソ連の核弾頭開発研究所 ITP (Inst. Tech. Phys., Snezhinsk : 俗称 Russian LLNL) が、我々に mini FUJI の共同建設を提案し、日・米・露三国共同開発計画会議を三度持ち、研究所敷地内に建設予定地も決めました。

米国とは 1974 年頃より、亀井貫一郎氏の仲介で米熔融塩産業グループと連携して日本社会への熔融塩炉開発提案を始め、カーター大統領の推奨も受けました。1992 年にはブッシュ大統領科学技術補佐官 Dr. A. Bromley に会見し、彼は若いときに加速器増殖の基礎研究に従事したとのことで、この構想を適格に理解し激励してくれました。1997 年にはクリントン大統領科学技術補佐官 Dr. J. H. Gibbons を訪問し激励され、「エネルギー省に説明する。Oak Ridge 国立研 (ORNL) との協力にも問題ない。」と三国共同への理解をえました。

なお、元 ORNL 所長 Dr. Weinberg を始め多数の友人を米国内に持ち、三十年以上多大の協力をえています。最近、米政府の革新原発開発計画 GIF (Generation IV Internat. Forum) が選んだ 6 炉型中に、熔融塩炉も採用されました。その他、LLNL が特に協力的で、彼らと我々が共同で予算請求を行いました。

さらに OECD (経済協力開発機構) 内の国際エネルギー機関 IEA (Int. Ene. Agency) と原子力エネルギー機関 NEA (Nucl. Ene. Agency) が、IAEA (国際原子力機関) との異例の「共同調査研究」: Three Agency Study (TAS) 『次世代用原発の研究開発』を 2002 年秋に公表しましたが、そこでは我々の「FUJI」を含む 12 炉型を国際共同開発に推薦されました。

非常に有難い事態ではあるが、私見としては、上記 6 ないし 12 の炉型を 2、3 個以下に絞るのは至難です。これからの本格的な革新原発開発は

「民間企業の仕事であるべき」と考えます。核分裂炉実現以来すでに六十年が経過し、しかも超異例の巨大投資がなされた発電炉事業に、まだ国家・国際機関が関わるのはおかしいし、それで真の活力ある世界産業が育つはずがありません。

全世界・地球の問題解決に役立つ、健全な大民間産業を確立できねば無意味です。しかし、船頭多くしては非効率だから日・米・露三国を中心とし、それに関心の高い諸外国から一～二名ずつ研究員を受容れて推進したい。参加の意志ある国には印・仏・ベラルーシ・韓国・中国・トルコ・チェコ・ブラジル・カナダ・英などがあり、将来、

各国がこの炉の早い実用化を図る際に、彼等の存在が非常に役立つでしょう。

なお、他に批准しうるような革新炉型があるでしょうか？ 安全性・核拡散防止性（Pu 問題）・核燃料増殖サイクル完成（核廃棄物問題）・経済性の全てを解決しつつ世界に展開できるような炉型は他には考えられない、というのが筆者の結論です。

文 献

- 1) 佐々木申二；“人工化学の元素”「最新の化学とその応用」34～46 頁（1949）