

理想的な核エネルギー利用体系を求めて ——トリウム熔融塩核エネルギー協働システム——

古川和男 <トリウム熔融塩国際フォーラム 255-0003 神奈川県中郡大磯町大磯 1029-5>

加藤義夫 <トリウム熔融塩国際フォーラム 255-0003 神奈川県中郡大磯町大磯 1029-5>

再生型太陽エネルギーが主力となるのは世紀末であり、化石燃料との中間は核分裂エネルギーで埋めざるをえない。その安全性・核廃棄物・プルトニウム問題等の決定的改善に向け、照射損傷なく核反応・熱輸送・化学処理媒体を兼ねる ${}^7\text{LiF}\text{-BeF}_2$ 系熔融フッ化物塩を液体核燃料に利用して、トリウム増殖サイクルの熔融塩核エネルギー協働システムを世界に展開すべきである。これは、黒鉛減速燃料自給自足型の公共施設的小型原発と、スプレーション反応利用で核転換増殖する加速器熔融塩増殖施設からなる。世紀末の太陽エネルギーへの本格的交代期（即ち、核分裂エネルギーの終焉期）には、この協働システムから出る余剰中性子（核燃料）を利用して経済的に核廃棄物を消滅しつつ、地球環境・貧困解決のみでなく、着実な核兵器完全廃絶を目指すことができよう。

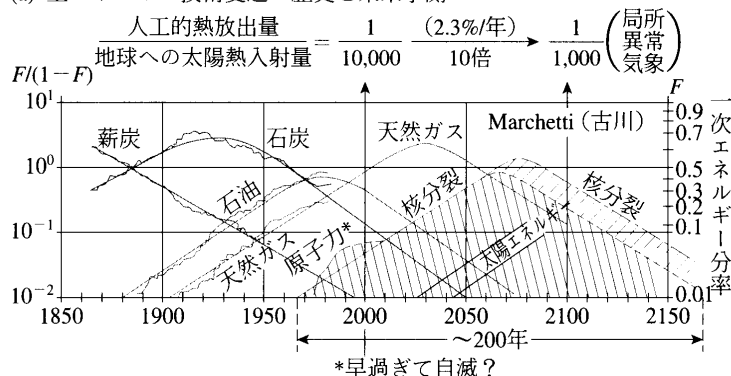
1. はじめに

世界で20億人は電灯さえ持たぬという。その一方で、人類は地球を破壊するほどエネルギーを使用している。この貧困そしてエネルギー・環境問題の解決策が求められている。気候変動に関する政府間パネル IPCC の1995年結論「環境変動は人類の責任」を疑問視するのも良いが、それは研究上であり、生存戦略上は許されない時点に達しているが、対策を持っているのであろうか。

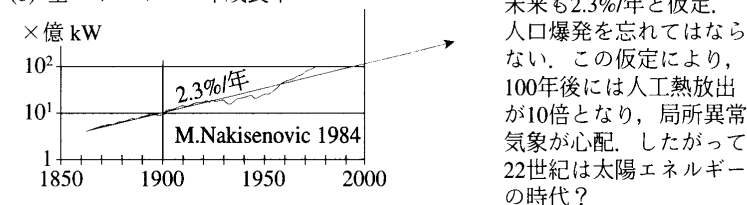
我々は未来の大局を図1のように予測している。¹⁻³⁾ 自明のように、今世紀前半の主要エネルギー技術はまだ化石燃料、特に汚染の少ない天然ガスに頼らざるをえない。しかし事態は深刻で、温暖化ガス放出低減のため、再生型太陽エネルギーまたは核エネルギー利用の助長が急務である。前者は好ましいが、未だ補助ないし特殊目的にしか役立たない。図1(a)の最上段の補足解説から予測される異常気象の防止のためにも、今世紀末までの太陽エネルギー実用化は必須と考えるが、両者の中間を埋める救済策としては、基盤的社会支援施設が一応整った核エネルギーに緊急に頼らざるをえない。すでに環境問題のリーダーラブロック (J. Lovelock) らやスウェーデン・ドイツなどの世論調査結果も認め始めた。

しかし、事態は既に手遅れに近く、図1(a) (d) のように核エネルギーが実用されても、(c) のように大気中への CO_2 放出量の2~3倍増大が2070年辺りまで続くのは避けられそうにない。なおこの図1は多くの仮定に基づいており、特に (b) の仮定は異論があろう。低くできれば幸いだが、事態の本質はたいして変わらないことを知っておいて欲しい。問題は、地球汚染を放置するか、早急な改善は貧困・テロ撲滅にも直結す

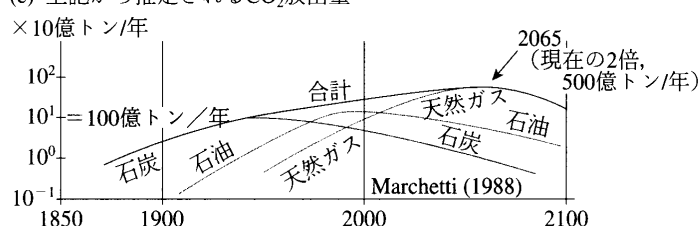
(a) 主エネルギー技術変遷の歴史と未来予測



(b) 全エネルギーの年成長率



(c) 上記から推定される CO_2 放出量



(d) 同じく推定される核エネルギー生産量

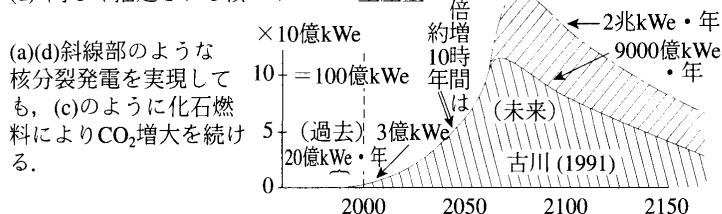


図1 21世紀に必要な核分裂エネルギー産業の将来と規模予測。Fは世界の全一次エネルギー使用量の中の分率。核分裂の曲線は2例を参考までに示した。*初期曲線は立ち上がりが異常で経済速度でないが、それがスリー・マイル島TMIやChernobylの重大事故を誘引したとも解釈できる。(a) Marchetti (古川), (b, c) Marchetti (1988), (d) 古川 (1991)。

表1 エネルギー利用上で主要な核反応の特徴

	エネルギー取得	中性子取得
DT 核融合	容易でない	容 易
核分裂	容 易	容易でない
核スポレーション	困 難	十分に容易

る人道的緊急課題と認めるか否か、だと考える。

最近10年間で先進国のCO₂放出量が20%増大した(日本も10%に近い)との報道は重大である。日本の中東石油依存度は87%と、石油ショック時より悪化している。未だに国内戦略論議が主体であるが、地球を救わねば日本も救えないことを忘れてはならない。

2. 核エネルギーの本命は核分裂エネルギー

核エネルギー利用において役立つ主要な核反応は、核分裂・DT核融合・核スポレーションの3種である。それらの主要特性の比較を表1に示した。⁴⁾核スポレーション反応は中性子入手に優れた技術を提供する(第8節参照)。DT核融合反応は、中性子量に余裕があるが、エネルギー入手にはそれほど有利でなく、入力が必要である。燃料物質の重量当たりで比較して、核融合有利などと言うべきではない。DT核融合研究は、初期には原爆原料即ち中性子入手策として秘密裏に充足したもので、エネルギーが対象ではなかった。まだ、プラズマ閉じ込め方式や材料を含む炉科学的研究の段階であり、本格的な炉工学設計研究以前で理論はなく、実寸大の大型実験装置が必要なのであって、発電実験炉を考察する段階にはない。²⁾

我々の目的はエネルギー入手であり、それにはほとんど入力エネルギー不要かつ単純な核分裂が圧倒的に有利で、素反応当たり約200 MeVでDT核融合約18 MeVの10倍である。ただし発生する中性子の余裕は十分でなく、現に満足な核燃料増殖サイクルは実現していない。しかも、図1(d)から明らかなように、地球救済には発電量倍増時間を10年くらいにしなければならない。それを支える増殖発電炉はない。この中性子不足を核スポレーション反応で補おうというのが我々の戦略である(第8節参照)。ただし将来は、DT核融合利用による核燃料増殖の可能性も考えている。

3. 核分裂核化学反応エネルギー利用装置(原発)の実用化

核分裂エネルギー装置とは、「原子核分裂核化学反応エネルギー利用装置」である。これは主として発電用なので「原発」と略称させてもらうが、その本質は「核化学反応」であり、いくら微量であっても物質の化学変化を伴う。開

発初期には、軍事上緊急な開発のために核物質化学変化を無視して設計されたが、それが現原発の不完全不評の根源である。1970年以前の開発初期には「化学工学装置」と認識したR&Dが始まっていたのであるが、強烈な核冷戦が踏みこじってしまった。初心に帰り、先人に学ぶべきである。

化学プラントであるから、作業媒体は「液体」であるのが原則で、既に液体核燃料炉開発に膨大な努力が注がれていた。⁵⁾種々の液体の基礎研究も大いに進んだが、多くの技術的困難、失敗の末、「熔融塩」しかも「フッ化物熔融塩」が最良との結論が1970年頃には明らかになっていた。

4. 熔融塩核燃料炉の開発

この点の解説を最近の液体基礎研究一般の衰退は正のためにも詳しく行いたいだが、紙面がなく文献^{5, 2)}に譲る。

食塩のようなイオン性結晶が高温で熔融しイオン性液体となったのが熔融塩であるが、⁷LiF-BeF₂(略称Flibe, フリーベ)という異例に熱中性子吸収の小さい原子核群からなる優れた熔融塩媒体が米国ORNL(Oak Ridge 国立研究所)で発見されたのが、前節末の結論の基盤となっている。これに核反応物質類のフッ化物を溶解して核燃料とする。なお熔融フリーベの物性値⁶⁾と構造⁷⁾はかなり整理してあるが、このフリーベ系核燃料の優れた性質概要を図2に示

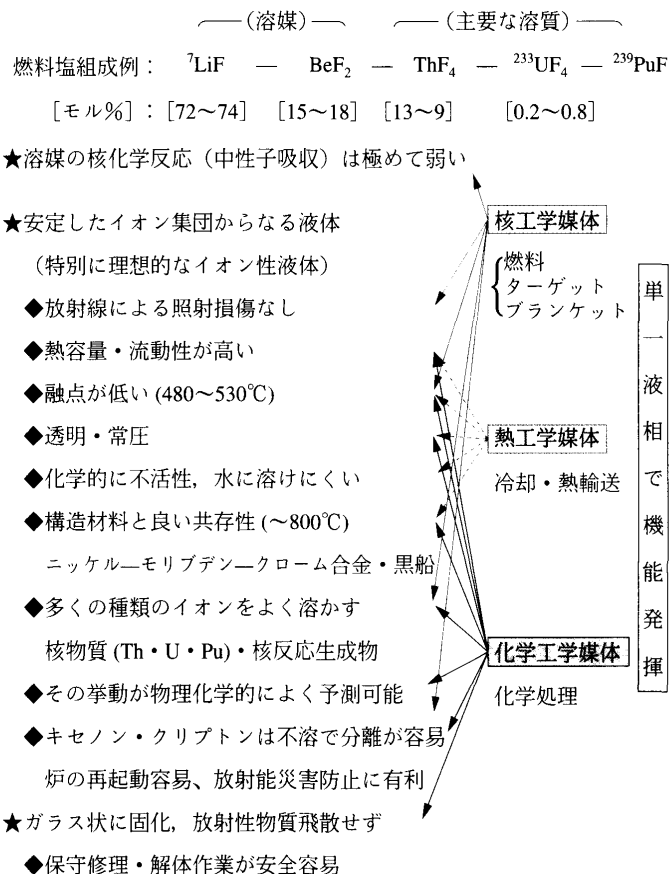


図2 フリーベ(LiF-BeF₂)系熔融塩核燃料の特色

した。 ${}^6\text{Li}$ によるトリチウム生産を抑えるために ${}^7\text{Li}$ は99.99%くらいに濃縮を要するが、天然に92.5%存在する上に残りの ${}^6\text{Li}$ との重量比が十分大きく濃縮容易で、60円/g以下で得られ、余り問題ではない。

図2に少し注釈すると、フリーベは最小半径のイオン群から構成され、イオン数密度最大で比熱最大となる。イオン性が最も高く安定で、それにやはり最もイオン性の高い元素群のアクチノイドおよび主要な核分裂生成物の塩が加わっても、安定かつ理想的なイオン性液体という本性は崩れない。従って、照射損傷皆無など抜群の長所に続いて、この物質系は本質的に古典的静電相互作用で成り立っているため、古典的物理化学(電気化学)理論により実に見事に物理化学的挙動が予測できる。しかもこの液体1相で核反応・熱輸送・化学処理媒体の全機能を発揮できるのである。

フリーベは液体構造化学的(イオン半径比・電荷比)にはMg珪酸塩と同等な物質系で、地球マグマないし製鉄スラグと類似なので、化学処理操作にも最適であり、超高度の多彩な炉機能が最も単純な炉構造で実現できることとなる。^{2,3,6)}

ORNLはこの原則に忠実にR & Dを展開した(1947-1976年)。従って、ほとんど全ての技術問題を試行錯誤の手法ではなしに解決できた。まず確かりと熔融塩の電気化学的基礎データも整えつつR & Dを進めたのである。余りに僅かの人数(直接要員230名)と経費で、実験炉(MSRE: Molten-Salt Reactor Experiment, 図3参照)を約4年間(1965-1969)無事故で運転し、基本的R & Dを完成させている。⁸⁾ 二十世紀最高の工学業績と評価すべきであろう。これらの長所は今後の開発改良作業においても大いに効果

を発揮するはずで、極めて貴重である。ただし逆説的に、僻地の小グループのみで成功し、無事故で社会に知られず話題とならなかったのが欠点、弱点と言えよう。

最初の総合報告が公開されたのは1958年であるが、世界の多くの人を魅了した。古川もその一人としてライフワークと定め、今まで改良に努めてきた。その最大の改良事項は、「核分裂増殖発電炉」開発の否定である(増殖問題は後述)。理由を前もって簡潔に示すと、(1) 図1(d)に示した発電量倍増時間(起動に必要な核燃料物質質量で決まる)10年実現は全く不可能で、U-Pu高速炉系で精々30年(スーパーフェニックス炉では100年)、Th-U熔融塩炉系でも20年である。(2) 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ないが、増殖炉は中性子不足(表1)から無理を重ね、大型複雑とならざるをえない。結論として、(3) 増殖発電炉は諦めて原発は単純に留め、増殖機能は別施設との協働で果たすことである。スポレーション反応利用が有望である。

体系の増殖負担を軽減するために、原発は核分裂性物質の再生率が略100%、即ち「燃料自給自足型」であるのが理想である。結果として運転に伴う炉性能の変動を最少限にでき、安全性が高まり運転容易となるのも好都合である。今後の「小型革新炉」開発一般では必須な目標である。

5. トリウム利用-Th-U核燃料増殖サイクル

熔融塩炉原発では、もう一つ新しい技術を利用する。それは非軍事的なトリウム(Th)利用であり、20年以前であればそれほど真新しい話題ではなかったが、狂気の核冷戦が抹殺してしまった。現にその利用を本命とする熔融塩炉自身も開発停止に追い込まれた。平和利用を掲げる日本さえ我々に手を貸さなかった。(旧ソ連は熱心で我々に近く、1983年から共同開発を提案してきた。仏は1987年に。)

このTh利用技術の基本解説^{2,10)}も詳しくは行えないが、U技術と比較して最重要な特色は、(1) Th資源は独占不可能なくらいに普遍的で豊富、(2) ${}^{232}\text{Th}$ のみからなり ${}^{238}\text{U}$ と同等な親核物質だが、中性子添加で核分裂性 ${}^{233}\text{U}$ となり、熱中性子炉では他の核分裂性核種より中性子再生増殖性能が優れ、しかし質量数が6少なく高質量のPu, Am, Cmなどの超ウラン元素が生産されない。また(3) 実用的には ${}^{233}\text{U}$ と共に微量生成される ${}^{232}\text{U}$ (半減期72年)がアルファ線崩壊を繰り返した後、異例に強烈なガンマ線(2.6 MeV)を放出する ${}^{208}\text{Tl}$ となるので、監視、検出が容易である。その遮蔽には鉛で0.25 m、コンクリートで1 mの厚さを要し(軍用に不

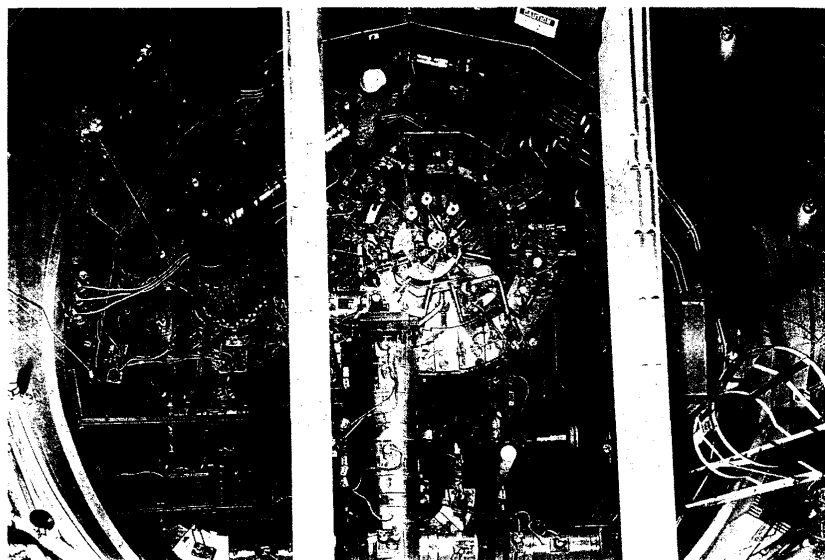


図3 運転直前の熔融塩実験炉 MSRE (米・ORNL) の炉格納室内部。1965年より1969年末まで26,076時間運転、無事故と言える。中央左は燃料塩ポンプ、下は中間熱交換器。

適), 固体核燃料であればその遮蔽と遠隔操作が高価につき, 実用困難となる。

その点, 熔融塩核燃料であれば全く問題ない。さらにこの熔融塩には裸の黒鉛減速材が濡れずに直接浸漬できる。ORNL は, これを熱中性子増殖発電炉 (MSBR: Molten-Salt Breeder Reactor)^{8,9)} として完成させようとした。しかも, 炉内バイパス系に連続化学処理装置を加え, 高速増殖炉系を凌ぐ20年の倍增時間を目指した。部分開発はかなり進んだが, 化学的酸化還元操作に耐える容器材料選定が難しく, 化学的に中性の炉本体より材料開発が決定的に困難となる。これも我々が増殖炉を否定した要因である。炉容器材料としては, 優れた Ni-Mo-Cr 合金 (Hastelloy-N) が開発されている (日系二世 H. Inoue の発明である)。

しかし, 核燃料増殖サイクルの完成は必要である。使用済み核燃料は放置できないし, 使い始めた核物質は核廃棄物を含め可能な限り消費消滅させたい。その作業媒体としてもこの熔融塩が最良である。少々の不純物で物性はほとんど変化しないので, それらを核燃料サイクル内に残して次第に核消滅させれば良く, 不必要な化学分離 (汚染廃棄物を増やす作業) が避けられる。核燃料組成変動に伴う照射再試験などの多大な手数経費を要する作業は一切不要である。

6. 小型トリウム熔融塩発電炉: FUJI

上述の熔融塩核燃料を使用し, Th-U 核燃料増殖サイクル完成を目指した開発計画が ORNL で熱心に進められ (1947-1976), 多大の成果が得られつつあった。⁴⁾ 中心は黒

鉛減速の熔融塩増殖発電炉 (MSBR) であったが, 前述のように幾つか欠点がある: (1) 増殖性能不足, (2) 連続化学処理装置開発の困難, (3) 炉の大型複雑化等は既に説明したが, (4) 増殖性能を高めるために中性子密度が増大し, その高照射で炉心黒鉛が4年ごとの交換を必要とし, その困難な炉開閉操作が液体核燃料炉の利点を損なう。

我々は, このような生産工場的な原発ではなく, 上記諸欠点を排除し, 世界に広く展開できる公共施設的で炉構造・運転保守が単純な 16 万 kW 小型熔融塩炉の設計に成功した。しかも, 何も特殊操作はせずに炉内の適切な黒鉛配置により「核燃料自給自足型」とすることができた。¹¹⁾

小型炉なのでそこまでの改良は期待していなかったが, 黒鉛が損傷しないように炉心の中性子密度を下げ, 熱出力密度を下げたところ, 冷却材即ち熔融塩燃料を減らすことができ, 黒鉛の割合が増えて減速能が高まり燃料自給自足型が実現できることが判明したのである。

数カ月に一度の Th 塩添加 (日量約 400 g 相当) 以外に炉寿命の間核燃料はほとんど添加しないが良い。炉性能の変動はほとんどなく, 原理上は制御棒も不要に近く, 発電所として理想的な原発になる。これを我々は FUJI (不二) と名づけた (図 4-6, 表 2 参照)。

なお, 熔融塩には核分裂生成物の希ガス (Kr, Xe) 溶解度はないから, 自動的に燃料塩上部のヘリウムカバーガス相に放出され, 除去できる。それらによる巨大な熱中性子吸収損失がなくなり炉性能が高まるのみでなく, 事故時の放射性物質放出がほとんどなくなる。(トリチウムは熱交換器壁を抜けて二次系熔融塩に移行し, そのカバーガス中

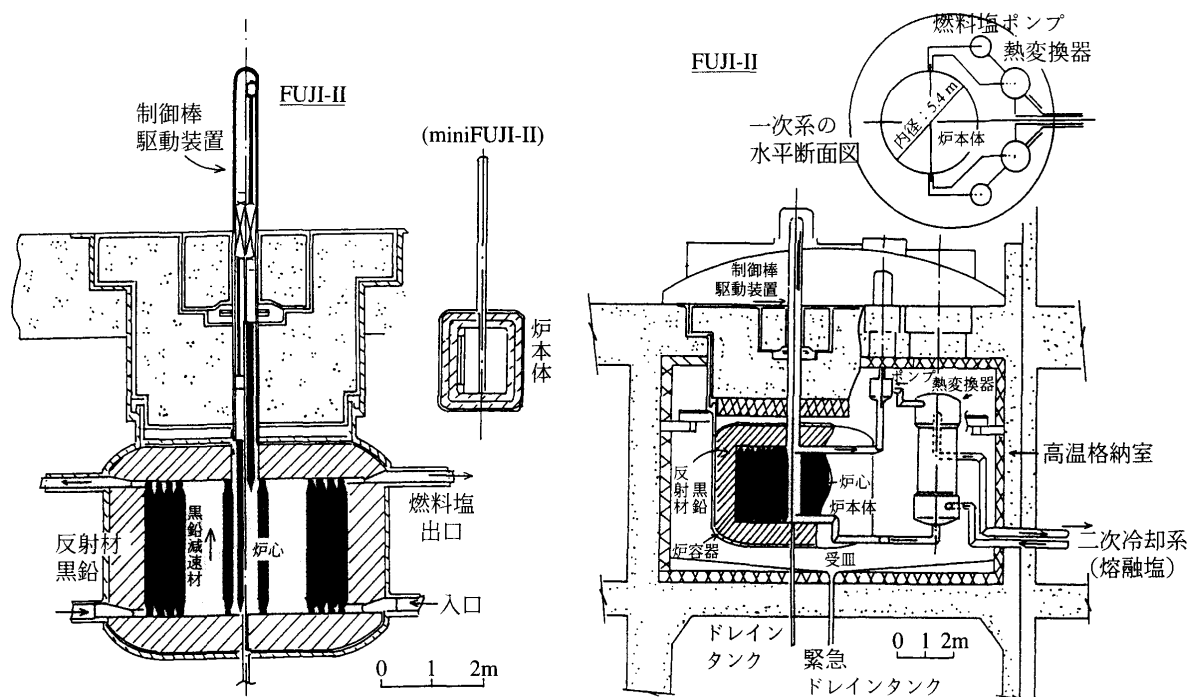


図4 小型熔融塩炉 FUJI 炉本体および1次系断面図 (付 miniFUJI)。

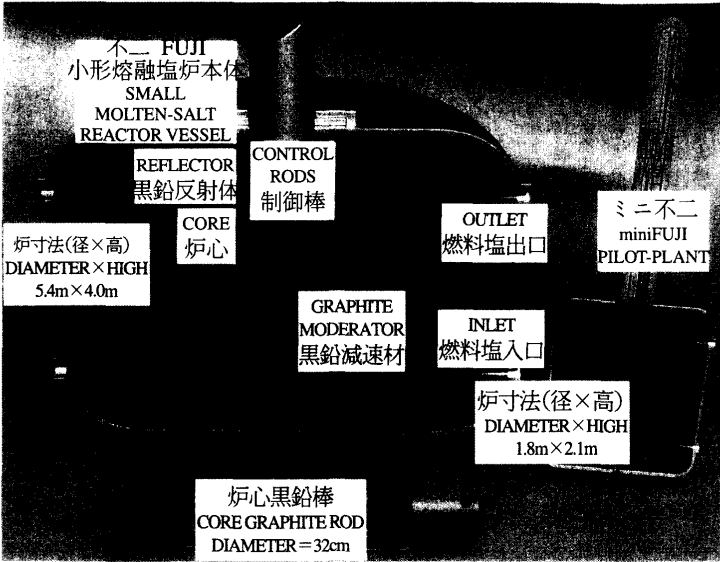


図5 小型熔融塩炉 FUJI および miniFUJI の炉本体模型写真。炉内部は空間の90%以上を占める黒鉛と、隙間の燃料塩のみ。

の水分として常時分離される。なおこの二次系で水蒸気発電を行う。)

核燃料塩が漏れても、圧力がなく化学反応性がないので、受け皿でタンクに導けばよい。炉内に燃料がなくなれば、炉は停止するのみである。臨界事故などは起こりえない。炉外には減速材がないからである。黒鉛融点は4,000度で、炉心熔融は考えようがない。

炉の内部構造は単純(図4, 5参照)で、裸の黒鉛が空間の90%を占め、熔融塩が隙間を流れる(流速1 m/s以下)のみである。その他の物質はなく、炉容器は開閉不要である。炉の余剰反応度は常に極めて僅かであり、自己制御性・負荷追従性も十分であるが、制御用には黒鉛制御棒を使用し、中性子の減速即ちスペクトル変化を利用するので、制御棒による中性子の損失はないに等しい。(但し、炉停止用には緊急用も含めて中性子吸収材の制御棒を炉外に装備する。)燃料塩の循環している一次系全体は、融点773K以上に保った高温格納室内に納めてあるので、炉体や機器は皆裸同然で単純であり、常時の点検や修理は全て遠隔で行える。作業員被爆の機会はない。

容器材料としては独自のNi-Mo-Cr合金(Hastelloy-N)が開発されている。熔融燃料塩に対して電気化学的に安定であり、十分な耐

表2 小型熔融塩炉の主要特性値。

	不二 FUJI 燃料自給自足 FUEL SELF- SUSTAIN	ミニ不二 miniFUJI 超小型 PILOT-PLANT	Oak Ridge N.L. MSRE 実験炉 (1965-69 運転)
熱容量(万 kW)	35	1.67	0.73
発電容量(万 kW)	16.1	0.7	—
効率(%)	46	42	—
炉寸法(径×高)(m)	5.4×4	1.8×2.1	1.45×2.2
高温室(径×高)(m)	12×8	3.7×2.2	(5.8×7.2)
核燃料転換率(%)	100.2	58	—
²³³ U 保有量(kg)	370	27	32
²³² Th 保有量(kg)	20,100	650	—
²³³ UF ₄ 濃度(mol%)	0.22	0.47	0.14
総量(m ³)	13.7	0.45	2.1
流量(m ³ /min)	33.2	1.59	4.5
温度(°C)	585-725	560-700	632-654
主配管(径)(cm)	25	8	15

食性が証明されている。しかも水冷却炉のような表面耐食皮膜に依存しないので、未解決の応力腐食に悩まされることはない。これはCr成分が比較的少なく、加工溶接性に優れており、耐熱度はすでに1,200 K以上あるので、将来容易にこの熔融塩炉を工業熱供給炉として開発できるであろう。熔融塩は常圧の最良の長距離熱輸送媒体で、利用側の温度低下がガスの場合の1/3くらいであり、優れた核燃料サイクルを完成できるなど、高温ガス炉系に勝る可能性がある。この高温熱源を利用する水素時代への対応にも有利といって良いであろう。

もっと詳しい解説は文献^{2,3,8,9)}に譲らざるをえないが、チェルノブイリのような重大事故は決して起こさず、恐らく軍事攻撃・内部破壊活動に対しても相対的に最も安全な

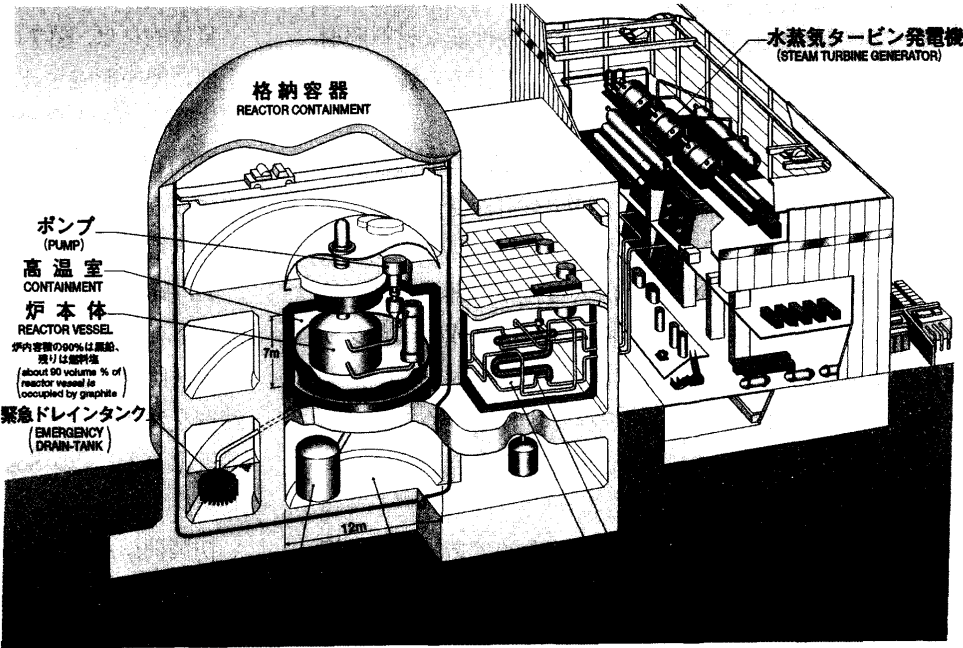


図6 標準小型熔融塩炉 FUJI の発電所全体概念図。

炉型と主張できよう。

なお、小型でもなぜ経済性の高いものになるか、もう少し補足しよう。まず、上記のように安全だから、固体炉で次々に要求される巨大な諸安全確保用補助施設が不要となる。また、固体燃料体に関連する製造/検査/保管/輸送/持込/交換/冷却/再処理/再加工/——といった作業・工場・装置の大部分が不要になる。炉体としても、固体炉では燃料体取扱い機構は大きく複雑・精密なものとなり、小型炉に一組ずつ装着しては経済的負担が多すぎる。

これらの経済効果は複雑多岐で、社会構造・規模・展開時点に大きく依存し定量評価は容易でないが、決定的に有利なのは明白である。発電所本体のコストについては、既に詳細な評価が ORNL によって MSBR につき、⁸⁾ また最近米ローレンスリバモア国立研究所 (LLNL) によって非増殖炉に対して行われ、現行軽水炉より有利という結論¹²⁾ が得られている。

7. 当面の開発戦略

技術の基礎は ORNL によって十分整えられている。しかも図 3 に示したような実験炉 MSRE が 4 年間、事故皆無といえる成果を挙げている。この炉の核燃料燃焼実績は FUJI の約 10 年運転分に相当する。従って、次に半実用小型炉建設に進めないこともないが、30 年のブランクがある。まず MSRE に近い 7,000 kW 発電実験炉 miniFUJI (図 4～5, 表 2 参照) の建設運転からかかり、基礎技術確認と人員養成を終え、次いで約 15 年後に約 16 万 kW の小型熔融塩原発 FUJI を完成させたいと考えている。資金は僅かで済む。

ORNL の OB たちが協力を約し、ロシアの核弾頭開発研究所 Inst. Tech. Physics (ITP) が場所提供も含む協力を提案している。ロシアの開発施設 (特に高性能な材料照射試験炉など)・人材・必要性への意欲などは替え難い存在である。米露政府も支持を表明している。

初期の核分裂性核種には何でも使えるが、当面は世界中で始末に困っている軍用民需用の Pu を引き受け焼却しつつ、炉内で Th から ^{233}U を生産すれば一石二鳥である。既存使用済み固体核燃料の単純経済的な化学処理法には、仏に始まり旧ソ連がチェコ・仏の協力ではほぼ完成させたフッ素化熔融塩 FREGATE 法を利用し、燃料粉体をフッ素ガス中で一気に Pu 含有熔融塩核燃料とすれば極めて経済的で、世界の使用済み核燃料や Pu 問題全般を合理的に解決できよう。

この処理法の原型は、高速増殖炉のためであって熔融塩から再び固体燃料体を精製製作しなければならなかったが、我々の方式では固体に戻すのが不要になるばかりか、余り塩の純度を上げなくて使用できるのは決定的利点である。

8. トリウム・ウラン核燃料増殖サイクルの完成

これで発電所は解決したが、次は核燃料増殖サイクルの完成である。これには約 1 GeV に加速した陽子と Th 原子核とのスポレーション反応を利用する加速器熔融塩増殖炉 (AMSB: Accelerator Molten-Salt Breeder)^{14, 15)} によると良い。

この技術の基礎は、主としてカナダの物理学者たちの努力でほぼ 25 年前に確立された。¹³⁾ 指導者ルイス (W. B. Lewis) は、1955 年前後に既に主流となりつつあった高速増殖炉を否定し、高質量の原子核を含むターゲットの陽子スポレーション反応によって中性子を得、それを親核物質に吸収させて核燃料増殖を果たさせようとしたのである。なおスポレーション (spallation) は「核破碎」を意味するが、これは発見者ローレンス (E. O. Lawrence) の錯覚であり、主反応は陽子入射で内部温度の上がった核からの中性子蒸発といった方が良いであろう。従って我々は訳さずに「スポレーション」の語を使用するのを推奨している。¹³⁾

彼らは、大電流陽子線形加速器の開発にも大いに成果を上げつつ、核反応体系の開発にも努力した。主要技術問題はターゲット入射部のビームラインとの真空隔壁 (入射窓) を含めての各部の照射損傷・熱除去である。ターゲットの照射損傷回避に液体金属を考えたが、その技術や容器を含め、炉化学的解決策を持たなかった。その対策として、Th 含有のフリーベ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かない設計を提案したのが我々の AMSB (1980 年発明) である。これには、故塚田甲子男と中原康明両氏の多大の協力を得た。^{14, 15)}

なお将来は DT 核融合利用の可能性もある。それにもフリーベ系熔融塩ブランケットは最適であり種々の検討を行ったが、まだ基本的技術基盤が立ち遅れている。¹⁵⁾

具体的には、図 7 のように直径約 4 m 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射すれば良い。照射損傷は受けず、熱除去にも最適である。塩は $^7\text{LiF}-\text{BeF}_2-\text{ThF}_4$ からなり、次第に $^{233}\text{UF}_4$ が増えたならばそのまま汲み出して発電炉に運べば良い。希釈用には、使用済み燃料塩から核分裂性核種と廃棄物を除いた塩を使用する。

Th 濃度を高めた核燃料塩をターゲット/ブランケットに兼用させ、入射窓にガスカーテン入射技術等を応用するならば、照射損傷・熱除去などに困難はなく、大電流陽子加速器を 20 年後に実用化できれば問題はない。^{13, 16)} 解析には、最近 Belarus の Sosny Sci. Center (Minsk) が協力してくれた。

初装荷熔融塩に核燃料を入れない (標準型) スポレーションターゲットの場合 ($^7\text{LiF}-\text{BeF}_2-\text{ThF}_4$: 64-18-18 mol%), 陽子ビーム 1 GeV, 200 mA 換算に対する ^{233}U の生産量は概略 400～600 kg/年程度と評価されており、小型熔融塩

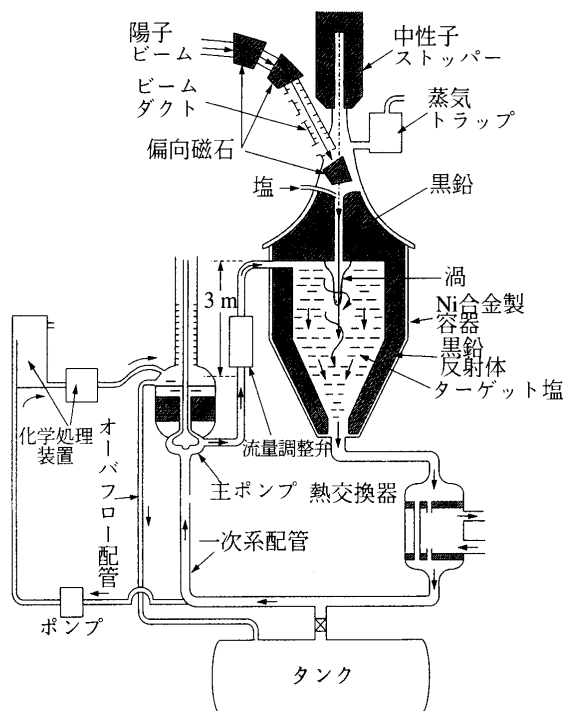


図7 加速器熔融塩増殖炉 AMSB のターゲット/ブランケット系概念図。核反応は入射液面下約 1m が最も激しい。

発電炉 (FUJI- ^{233}U : 160 MWe) の初装荷燃料として必要な、 ^{233}U 約 400 kg をほぼ 1 年程度の運転で生産できるであろう。

上記ターゲットに $^{233}\text{U} + ^{239}\text{Pu}$ を種々の組成比で入れ、 ^{239}Pu の燃焼を利用した場合の ^{233}U 生産量を陽子ビーム電流 300 mA として試算した。¹⁵⁾ これは前記標準型ターゲットにおいて生成する ^{233}U の蓄積と、外部に存在する余剰 Pu とを利用して ^{233}U の生産効率の改善を図る試みでもある。その一例を示すと、前記の標準型塩組成の (ThF_4 : 18 mol%) を (ThF_4 - $^{233}\text{UF}_4$ - $^{239}\text{PuF}_3$: 17.4-0.1-0.5 mol%) の組成に置き換え、初装荷量を Th: 129 t, ^{233}U : 746 kg, ^{239}Pu : 3,824 kg とした場合に、 ^{233}U の正味生産量は 657 kg/年、また Pu の減少量 (分裂+吸収) は 215 kg/年、ターゲットの中性子実効増倍係数 (K_{eff}) は 0.56、またターゲットの発熱による出力は電気出力換算で 386 MWe であった。

上記の例のようにターゲットに最初から核燃料物質を装荷させる方式で、中性子の K_{eff} をさらに 1 に近づけ陽子ビーム電流を減少させる方法や、核分裂によって生じるターゲットの多量な熱出力を利用して加速器系の電力を賄う self-sustain 方式等についても論議がなされているが、安全性・経済性その他の制約条件など未だ十分に整理されていないので、ここでは触れない。

20 世紀の加速器開発は、専ら加速粒子の高エネルギー化に努力が注がれ、めざましい進展を遂げた。この技術基盤と人材・資金を、今後は大電流化 (1 GeV, ~ 200 mA) にも向けるなら、その実現は可能と信じたい。仮にその実用化開発が遅れる場合を想定しても、以下のような次善の対策

があるから基本構想は揺るがないであろう。

先に述べたように熔融塩炉の起動には ^{233}U の他に ^{235}U , ^{239}Pu でも可能であるから、熔融塩発電炉 (FUJI- ^{233}U : 160 MWe) の初期燃料としては ^{233}U 約 400 kg が必要である。 ^{239}Pu 起動の小型熔融塩発電炉 (FUJI-Pu: 110 MWe, 初装荷 Pu: 530 kg) を 1,000 日運転後には約 190 kg の ^{233}U が生成するから、2 基の FUJI-Pu の約 2.7 年運転から 1 基の FUJI- ^{233}U (160 MWe) の起動が可能となると試算されている。これは一例であるが、こうした対策があるから、加速器開発の進捗にも柔軟に対処できる。

以上で予備検討結果の概略を示したが、FUJI の性能もまだ設計パラメータ組合せの改良で、大いに改善の可能性がある。さらに、AMSB に関しては、理論計算の精度はまだ低い。特に低質量を含む体系でそうであるので、現在 Sosny Sci. Center において、低エネルギー中性子部分の実験も含めた理論計算法の改良が進められつつある。また固化した塩に対する陽子入射実験も計画されている。その結果に基づいて適切な塩組成を選択すれば、2 倍程度の性能向上もありうる精度と考えている。

なおここで指摘したい。第 6 節でも論じたように原発は公共施設であるのが原則で、単純かつ小型化もできねば世界に展開できない。従って、スポレーション利用の装置 (本性が工場的) を、未臨界型で暴走しないのを理由に一般原発として有用などと錯覚してはならない。我々の FUJI は既に原発として十分に安全かつ単純である。

9. 長期世界戦略について—トリウム熔融塩核エネルギー協働システムの完成—

以上より、解体核兵器および使用済燃料からの Pu を FUJI-Pu および AMSB で有効に燃やしつつ消滅させ、同時に ^{233}U を増殖生産しつつ、20~40 年かけて経済的な Th 増殖サイクルに円滑に移行できる技術基盤構築のシナリオは整った。

燃料自給自足型で小型にもできる FUJI 系発電炉は、苛酷事故の心配や Pu テロの恐れもない。AMSB ターゲット塩を汲み出し、少し組成調整すれば燃料塩となるが、炉寿命終了後、世界の 20~30 カ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) に燃料塩を持ち帰り、リサイクルされる。

「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、全体として増殖サイクルを構築させるのである。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)」と名づけた。

加速器を含めた全サイクルを 1 種類のフリーベ系フッ化

物熔融塩燃料が循環しているが、生成放射性物質もできるだけ塩中に留めて循環させ、自然の放射壊変および熱または高速中性子反応で次第に消滅させる。化学操作は最少限にするので、低レベル核廃棄物は激減しよう。なお、核廃棄物問題では、前述のように超ウラン元素が生産されないのが決定的な利点である。

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: 図1(a))においては、核燃料(即ち中性子)が余るので**核廃棄物の消滅**に積極的に利用できる。それにはAMSMBも大いに役立つ。貯蔵していた使用済み固体核燃料からの核廃棄物の処分も容易に引き受けられる。

加速器などによる核廃棄物の急い核転換消滅法は、膨大な電力・経費と核廃棄物再生産の恐れがあるが、このように熔融塩核燃料サイクル中、特に終焉期に処分するならば余剰核燃料の最終処分を兼ねるので、遥かに合理的経済的で一石二鳥である。約100年間の核廃棄物貯蔵で大部分の問題は解決できるであろう。これで、太陽エネルギー時代を安心して迎えられよう。

10. まとめ

エネルギー環境論議には余りに虚構が多い。一例を挙げると、出発点となる地下資源論で安易な有限論が流布確信されているが、我々は「実効的には無限」と考えるのが好ましいと主張している。あるからといったの浪費は論外かつ自滅への道であるが、今のように間もなく有限涸渇と全世界に信じさせたのは、余りに見事な利益誘導であり人類の敵である。それらの反証を含めつつ我々の新構想を、かなり詳しく解説書の『「原発」革命』(文春新書)³⁾で示した。具体的な技術内容もかなり解説したので、それで補足願えると幸いである。さらに半専門的な解説としては、文献2がある。まず知識人に理性を取り戻してほしいものである。

核エネルギー R & D の歴史は既に60年を経た。現在がその**理想的形態をまとめる最後の機会**である。なぜこのように回り道をしたのか。一つは核冷戦であるが、もう一つは原発を構想するに当たって**炉化学的問題意識**が炉物理的思考に比べ薄弱であった点を指摘したい。例えば構造材料問題にしても後追いの対応では成功しない。**液体核燃料利用・トリウム利用・増殖発電炉方式否定**という我々の提案はそのような視点から生まれたものである。一見暴論に聞こえようが、全く逆である。その包括的特徴を図8に要約して示した。理想に近いものとなる可能性が十分あるのを読み取っていただきたい。

地球の現状はもはや「待てない」状況にある。技術基盤は米国が作り、それを抜本的に改良、単純化したので開発

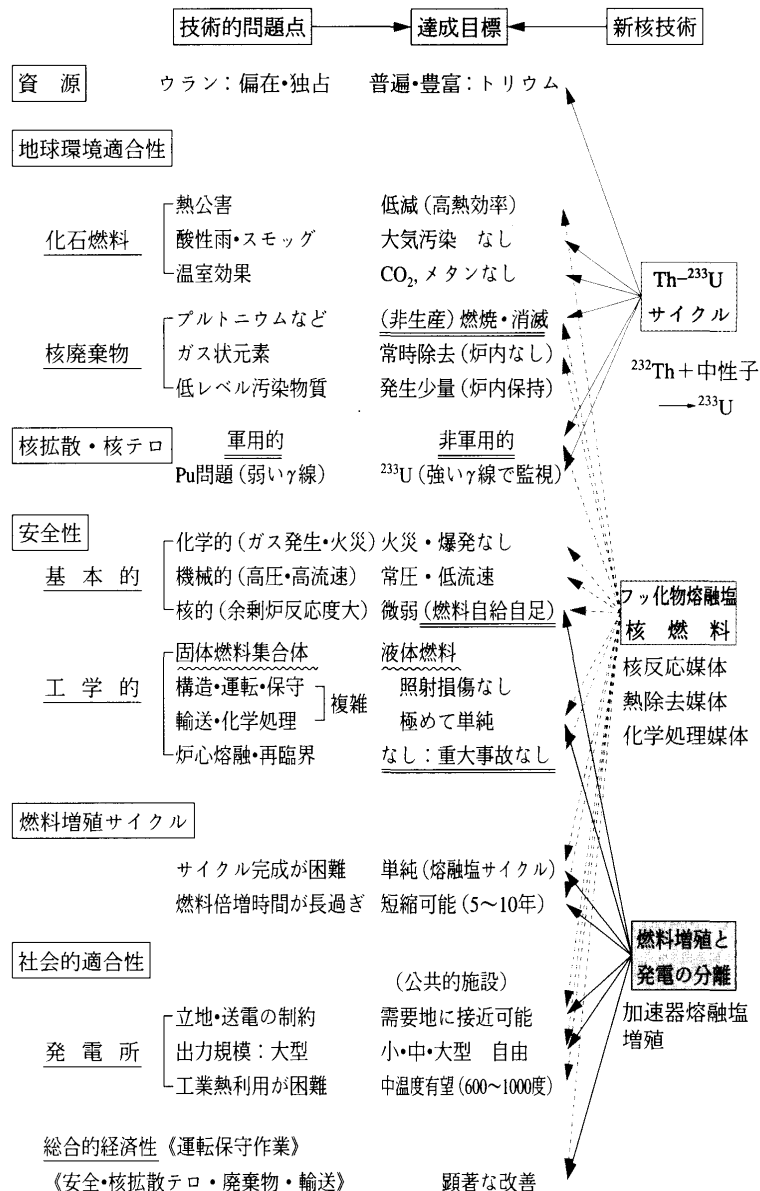


図8 新しい核エネルギー技術「トリウム熔融塩核エネルギー協働システム構想 (THORIMS-NES)」によるエネルギー環境問題の解決。

費は僅かで済む。しかも、始末に困っている民用軍用のPu処理を引き受けつつ発足でき、発電炉は単純小型であるから、既存の大型炉と不必要に競合せずに共存しつつ円滑に移行できる。これでこそ、過去に原発総発電量に比べ数百倍の発電を果しつつ世界に貢献できるであろう(図1(d))。

技術的実現可能性は十分と確信するが、さらなる技術革新による経済性・社会適合性向上の余地は多大である。それには受益市民社会との連携が必須である。

その一つとして、我々悲願の「核兵器完全廃絶」への**確かな方向づけ**も、Pu利用の完全排除を介して可能となるであろう。^{2,3)}そこでは民意を基盤にした民間原発産業こそが求められる。幸い我が国にはこの構想実現のための先進的技術基盤がある。Ni合金(Hastelloy-N)製造・高密度黒鉛・遠隔操作(ロボット)技術・高エネルギー陽子加

速器・高温機器・熔融塩技術・核燃料管理技術等々であり、その実現は全世界に展開可能な巨大産業の創成を意味する。次の新技術開発への波及効果も多大である。この開発に我々がイニシアチブを取ることの重要性(社会的利益)には、多言を要しないであろう。

最近、先進国中心の**経済協力開発機構 OECD**と国連組織の**国際原子力機関 IAEA**が、対立を超えての共同作業で有望な原発の国際共同開発促進提言書¹⁷⁾をまとめ、その中に我々の構想も選ばれている。世界8カ国の熔融塩炉専門家の支持も得てある(1997年)。¹⁸⁾ 初期成果の再確認と近代化を具体的に進めるべき時点に到達したのである。是非厳しいご検討を賜りたい。若い方々の挑戦を期待する。

なお、本構想を発展させるに当たっては、30年以上にわたる国内外数十人に及ぶ先覚者・研究者の多大な援助協力を得た。海外では米・仏・露・印・ベラルーシなどが著しく、国内では現在も豊橋技科大・北海道大学・静岡大学などが中心である。

2002年5月追記: 本年4月、LLNLのDr. R. Moirが代表で、我々のFUJI構想に基づいた米政府研究予算申請(NERI: Nucl. Ene. Research Initiative)が、ORNL, ANL(Argonne Nat. Lab.), Idaho Nat. Eng. Env. Lab., Univ. California, Berkeleyと共同でなされた。

参考文献

- 1) C. Marchetti and N. Nakicenovic: RR-79-13, IIASA (1987). C. Marchetti: *Perspect. in Energy* 2 (1992)19.
- 2) 古川和男: “来世紀の核エネルギーシステム” 原子力工業 37 (1991) No. 7 より12回連載, 計110頁(核融合は37, No. 12, AMSBは39, No. 11); エネルギー・資源 17 (1996) 332.
- 3) 古川和男: 『「原発」革命』文春新書(文芸春秋社, 2001).
- 4) A. A. Harms and M. Heidler: *Nuclear Energy Synergetics* (Plenum, 1982) p. 238. ハームズ・ハインドラー: 『核エネルギー協働システム概論』古川和男監訳(培風館, 1986).
- 5) 古川和男: 『原子炉工学講座IV: 液体燃料』(培風館, 1971) p. 77.
- 6) 古川和男, 大野英雄: 『無機融体の物性値. I. LiF-BeF₂系熔融塩』(日本原子力情報センター, 1980).
- 7) K. Furukawa, H. Ohno and N. Umesaki: *Condensed Matter Physics: Liquid and Solid States* (INDIAS, 2000) Chap. 9.
- 8) M. W. Rothenthal, P. N. Haubenreich and R. B. Briggs, ed.: *Development Status of Molten-Salt Breeder Reactors*, ORNL-4812 (1972) p. 416. J. R. Engel, et al.: ORNL/TM-7207 (1980).
- 9) 『熔融塩増殖炉』改訂増補版(日本原子力学会, 1981).
- 10) 『エネルギー・資源ハンドブック: トリウム・エネルギー』エネルギー・資源学会編(オーム社, 1996) p. 654.

- 11) K. Furukawa, K. Minami, T. Oosawa, M. Ohta, N. Nakamura, K. Mitachi and Y. Kato: *Proc. 4th Int. Conf. Emerging Nuclear Energy Systems* (World Scientific, 1987) p. 235. K. Furukawa, K. Mitachi and Y. Kato: *Nucl. Eng. Design* 136 (1992) 157.
- 12) R. W. Moir: *Nucl. Tech.* 138 (2002) 93.
- 13) 『スボレーション中性子工学』(日本原子力学会, 1984).
- 14) K. Furukawa, K. Tsukada and Y. Nakahara: *J. Nucl. Sci. Tech.* 18 (1981) 79.
- 15) K. Furukawa, A. Lecocq, Y. Kato and K. Mitachi: *J. Nucl. Sci. Tech.* 27 (1990) 1157.
- 16) Y. Kato, K. Furukawa, K. Mitachi and S. E. Chigrinov: *Proc. of 7th ICENES* (1993) p. 439.
- 17) OECD/IEA, OECD/NEA & IAEA: *R & D on Innovative Nuclear Reactors—Status and Prospects* (中間報告は1999. 11, 最終報告は未発表).
- 18) Int. Conf. Thorium Molten-Salt Reactor Development, RAND, Santa Monica, USA, 8-11 April, 1997.

非会員著者の紹介: 古川和男氏は1927年大分生れ。1951年京都大学理学部化学卒。東北大学金属材料研究所助教授, 日本原子力研究所, 東海大学教授を経て, 現在トリウム熔融塩国際フォーラム代表。専門は無機液体構造化学・融体利用核エネルギー工学。加藤義夫氏は1939年東京生れ。1962年東京電機大学電子工学科卒。日本原子力研究所を経て, 現在トリウム熔融塩国際フォーラム副代表。専門は高温融体工学。

(2002年2月20日原稿受付)

Searching for an Idealistic Nuclear Energy System——The Thorium Molten-Salt Nuclear Energy Synergetic System——

Kazuo Furukawa and Yosio Kato

abstract: The solar-based energy should become a global major one at the end of this century. The intermediate between fossil and solar energies has to be filled by the fission energy. For the decisive improvement of its safety, radioactive-waste and plutonium issues, the Thorium Molten-Salt Nuclear Energy Synergetic System should be established by the use of fluid-fuel of ⁷LiF-BeF₂-based molten fluoride salt, as a triple functional medium for nuclear-reaction, heat-transfer and chemical-process without radiation-damage. This system is composed of simple and economical fuel-self-sustaining small power reactors and Accelerator Molten-Salt Breeders for spallation breeding. The economical extinction of radioactive-wastes will be achieved by using excess fuel (neutron) at the phase-out period of this system near the end of this century. This technology will be essential for solving global environmental and poverty issues and for the complete abolition of nuclear weapons.