

MED 計画 について

大阪大学工学部 品川 睦 明*
原子力工学教室

表題について：MED計画というのは、Mobile Energy Depot の計画の略である¹⁾。つまり、かなり大きな動力源をポータブルにしようというわけである。ポータブルは言い過ぎとしても、「動くエネルギー源」というところであろう。

出力エネルギーのわりには型が小さくてすむものと云えば、どうしても原子炉ということになる。ところが、現在の原子炉では、研究用にしても発電用にしても、核分裂時の分裂片のもつ運動のエネルギーを正面から利用しようとしていない。ところがその運動エネルギーは、周知のように1分裂について放出するエネルギー 195 MeV 中の約8.5割を占める 165MeV にも上るのである。しかし、このエネルギー放出は、反応速度が大きいため、差し当り何かの形で受け止めて置かないといけぬ。従来の原子炉でその役割をしているのは、燃料ペレット自体であって、自己吸収の形で生れる熱エネルギーを冷却剤への熱交換によって取り出している。それでは、燃料自体の損傷への寄与は全くマイナスになってしまう。

そこで、このMED計画では、Fission Chemistry を実用化しようとしたわけである。他ではない、このフィシオ化学というのは、核分裂片の反跳のエネルギーや多価原子価イオンのチャージが、化学マトリックスに放射線化学的に作用して化学エネルギーに変換されることについての化学である。すなわち、核エネルギーによる化学一般、英語でいう Chemonuclear Reaction の一環である。あえて訳せば、Fission Chemistry は、核分裂線化学、Chemonuclear Reaction は、化学効果核反応とも云うべきかと思う。

ここでは、まづMED反応の実例を数例あげたのちフィシオ化学のあり方を少し紹介してみよう。

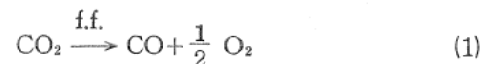
MED の二、三の例

海洋への応用：これは米国が、さきの大戦中海洋において自由に行動するために開発にとりかかった仕事である。つまりガダルカナル級の航空母艦とそれに積んだ海洋ヘリコプターの動力源に石油を用いないで、現場で母

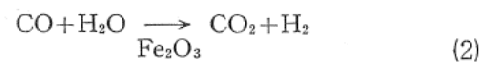
艦の原子炉をエネルギー源とし、原料は空気と水（海水）とでアンモニアをつくり、これをヘリコプター燃料としようとするものである。原子炉は、もちろん母艦の推進、電力供給をするほか、水の電解をして水素をとり、空気を液化して窒素を分けとる。これらの2つのガスから、高圧の下で液体アンモニアをつくる。電解で H₂ を 1 kg とするには、47.4 KW(e)-hr の電力が必要であり、熱の 20%が電気になると考えると、終局の必要熱エネルギー量は 236.3 KW(t) hr/kg H₂ となる²⁾。

セシウム金属と水とから H₂ をつくり、セシウムの回収に酸化金属高温分解反応を用いるという熱再生式のMED系も研究された³⁾。この方法によると、1 kg H₂ について 66 KW(t)-hr という至極低いエネルギー要求で済むが、一方熱再生式のために 982°C もの温度過剰を要する欠点がある。

月旅行用動力計画：原子炉、炭酸ガス及び水を用意する。この原子炉は、あとで述べる化学炉である。炭酸ガスを炉に通して、分裂片の運動のエネルギーをあてて還元させる。



このG値 (100 eV に反応する分子の数)は10である。このCOとH₂Oを酸化鉄触媒の下ではたらかせる。



ここでCO₂が再生される。(1)式の酸素と(2)式の水素とで燃料電池を形成させると、そこに電力がえられる。またそのため水が再生される。そのため(1)、(2)式のくり返しにより、核分裂のエネルギーが電力に転換される。そしてCO₂とH₂Oとの循環は、エネルギー転換の往復便の役割をしている。

式(1)において生成物の量は、W kg/hr、炉の熱出力 P kW(t)、G値をG、平均分裂片エネルギーの利用効率をE、生成物分子量をMとすれば、次の関係がある。

$$W/P = 0.624 \times 10^{-3} \text{ GEM} \frac{\text{kg}}{\text{kW(t)} \cdot \text{hr}} \quad (3)$$

式(3)で G=10、E=0.5 とし、それから式(1)のCOは式(2)のH₂に当量であることから水素生成を考えるととして

* 大阪大学工学部・教授

$M=2$ を採用すると、 $W/P = 0.624 \times 10^{-2} \text{ kg/kW} \cdot (\text{t}) \cdot \text{hr}$ となる。それゆえ、水素 1 kg を得るには $320 \text{ kW} \cdot \text{hr}$ を要することとなる。これは、標準的な水電解法によるよりも効率がわるいが、CO の生成熱のためには、ほんのわずかしこ消費されていないで、エネルギーの大方は発電のために費されている。

沙漠計画：沙漠の緑化を原子力でしようという試みである。すなわち電力、水それに肥料があればよいわけである。年間 1000kg の小麦をつくるに 40.5アールの面積が必要であり、それに要する毎日の灌がい水は約 16.7 m^3 、窒素肥料を N_2 として年間 20kg 必要とする。灌がい水は、蒸発の無駄を防ぐため単分子膜層で覆う技術で消費が半減するとし、半乾地帯で年間雨量 305mm (22.1 g/日/アール) なら全灌がい水は 273g/日/アール必要となる。

いまこのような需要を満すため、後述のシアン化水素製造用の化学炉を設け表 1 のような仕様にしたとすると、水の供給は N_2 の供給の約 1% となる。その不平均を直すためには、海水脱塩炉を別に設けるか⁴⁾、脱塩炉中に後述のヒドラジン・プラントのようなフィショ化学ループを設けるかする必要はある。

表1 HCN プラント仕様

プラント	パワー MW(t)	1200
G (HCN)		5.0
N_2 生産量	メートル・トン/年	310,000
純水生産量	g/日	114×10^6
全電力	KW (e)	171,000
需要パワー：		
	フィショ化学プラント KW(e)	110,500
	脱塩プラント "	45,500
	計	156,000
正味電力	KW(e)	15,000
N_2 供給可能面積	(20kg/40.5アール)アール	6.92×10^8
水 供給可能面積	(273g/日/アール)アール	4.11×10^6

フィショ化学

Harteck と Londes が 1956 年に報告⁵⁾ した $\text{N}_2 + \text{O}_2$ 系の窒素固定の試みがフィショ化学の始めといえる。このさい、 CO_2 を副反応の防止剤として用い $G(\text{NO}_2) = 5$ を得ている。これに Aerojet General Nucleonics 社が着目し、工業的設計と価格試算をはじめ、これに米空軍 Bookhaven 国立研、Union Carbide 社などが加わり広く基礎的並びに応用的研究がなされてきた。その概略は演者も紹介したが⁴⁾、原研高崎研東海分室のグル

ープの調査もある。

米国 AEC は J. H. Cusack をプログラム・マネジャーとして、上述両社、国立研などを動かして研究を行ったところは引用の各報告にあり、その行き届いた成果が示されている^{1), 6)}。中でも液体アンモニアよりヒドラジンの製造⁷⁾、 $\text{N}_2 - \text{O}_2$ 系よりの HCN の製造¹⁾ は大がかりな研究である。Cusack は去る第 8 回アイソトープ会議の招きにより来日し、本題について、まとまりのある講演を行った⁸⁾。

基礎研究^{1), 6)}：〔炉は LPTR (Livermore Pool Type Reactor, 2MWe) を使用〕

線源としては、 UO_2 の形の高濃縮 95% ^{235}U が主である。それをステンレス鋼板上に蒸着したもの、粒状としたものなどがあり、前者は基礎データをとるためのカプセル内照射源とし、後者は液体アンモニアとスラリーにして用いたりしている。またセンイ状に U_3O_8 や $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{UO}_2$ または ZrO_2 の固溶体メルトを鋼鉄細穴より吹き出させて整形 (直径 5 ミクロン) し、これをガス状ターゲット用に使ったりしている。このほか稀れに UC も使われる。また線源として、ガス、煙、ゾル、溶液、リボン、蜂巢、充填塔などの形もある。

これらの線源につき、Kahn⁹⁾ は化学マトリックスに放出するエネルギーの効率 E、ウラン源より抜け出る割合 S、分裂片平均エネルギー率 R との間に、 $E = S \cdot R$ の関係があることなど、分裂片の物理的挙動、トラック効果、化学反応、原子炉内照射様式と測定などの基礎研究を行った。このため、シリコン表面障壁型検出器を用い示差的吸収実験を行った。それには炉内照射用カプセル内で分裂片が化学マトリックスに与えるイオン化に伴うパルスを取り出し、検出増巾後 256 パルス波高に分け、オシロスコープにアナログ所見を与え、タイプライターにデジタル記録をさせる。パルス高とチャンネル番号は、 ^{234}U と ^{252}Cf の α 線で校正しておく。これらデータからブランクを引いて IBM 計算器入力に入れ、分裂片飛程とエネルギー定量のコードにより、全エネルギー、全核分裂数、1 分裂当りの平均エネルギーなどを知る仕組とする。

ヒドラジンの製造⁷⁾：要は炉の中にスラリーを廻らすのであるが、装置の構造としてはかなり複雑なプロセス系の組み合わせとなる。直観的にわかりやすくするために図 1 を描いてみた。まず材料試験炉内にスラリーを通すループを設ける。これはスラリー循環系といわれ、スラリーが 5~6 gpm で通る管、温度調節装置、分気装置、濾過装置などを備えている。この流れは制御された回転式遠心ポンプ 200 rpm で強制し、9.6 psi の圧力差でもって予定された速さでスラリーが循環させられる。照射

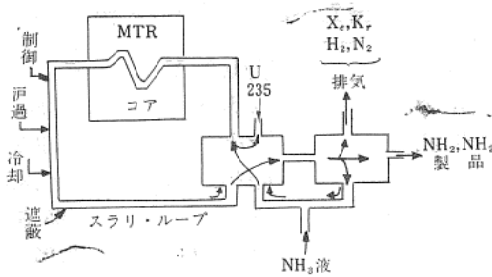


図1 ヒドラジン・プラント概念図

部分の全内容積は 5.5 l 程度であって、その中に 1 l 程度の液がたくわえられている。

この炉内の系はループの炉外部につながり、液体アンモニアの補給と除去の系、生成ガス除去系(触媒床中 O₂ と結合除去し、爆発を防ぐ)、UO₂ 補給系、液体試料採取部分、気体試料採取部分のほか、通排気系、ドレン系などを備えている。排気は、放射性的のフィジョン・ガスを含むから、地下に排気だめをおき、この中で減衰させる。行われた実験は数週間を 1 区切とし、MTR(Idaho) のパワー 40 MW 運転のもとで、1 区切 38g UO₂ をループ内に入れ、第 1 区切 0.15 KW ループ内パワーからはじめ、だんだん増してついに 8.5 KW まで 3 区切のパワーアップを行って、その間各種のデータをとっている。

この段階で G(N₂H₄)、G(H₂)、G(N₂) 値を γ 照射のみ、分裂片照射の場合などの比較のためにそれぞれとり、反応機構と実験条件を考察している。²³⁵UO₂ の 4.33g/l NH₃ で 1KW のパワーが出る。全 UO₂ 装荷を Lg とすれば、炉外ループに 19g あるとき有効値は L-19g である。炉内容積 4.06 l であるときループ内パワー P KW は、

$$P = \frac{L-19}{4.06 \times 4.33}$$

で計算できる。ある物質が分裂片のエネルギー 100 ev について何分子できるかという数を G_{ff} で示すと、M gmol/hr の生成量は、

$$M = 0.312 P G_{ff} E$$

で示される。同様に γ 線の場合の生成量は、

$$M_r = 0.373 P_r G_r$$

で示される。G(N₂H₄) は N₂H₄ 濃度 C が大きいほど減少する。G₀ を初期値、C_e を平衡濃度とすると、

$$G = G_0 \left(1 - \frac{C}{C_e}\right)$$

で表わせる。G₀ の値は、 γ 線のみときは 0.05、分裂片線の場合は 1.27 である。N₂H₄ 濃度は臭素滴定法によって求める。

以上の実験は 1440 時間にわたって行われたが、測定系、材料などの腐食試験の結果はほとんど問題はなかった。

ただスラリーがループ中の角隅部にたまり、ウラン放出エネルギーの損失のあることが認められた。なお生成 N₂H₄ の精製は一回の蒸留で除染係数 24000 にも上り、無遮蔽処理に適するところまで一挙に効果をあげることができるという。

シアン化水素の製造¹⁾: AGN-201- (Aerojet General Nucleonics) 炉 (20w, 1.2 × 10⁸ n·cm⁻²·sec⁻¹) (1963), GETR (General Electric Test Reactor) (8 × 10¹³ n·cm⁻²·sec⁻¹, Trail Cable Facility, Velocitos, Calif, 1963), UCRR (Union Carbide Research Reactor, GE TR と同型, 6 MW) 及び LPTR を用い実験。図 2 は、そのフローシートである。

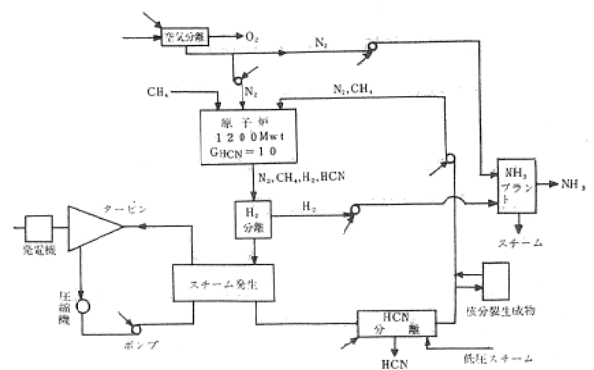


図2 シアン化水素プラント

センイ状の ZrO₂-UO₂ 固溶体線源が最も適している。これは、他のセラミックとの比較試験の結果である。化学マトリックスは、N₂-CH₃ で、400°C のとき G(HCN) = 3 を得た。各様のマトリックスが試みられた。すなわち NH₃-CH₄、NH₃-C₂H₆ などがそれである。これらの、⁶⁰Co、電子ビームなどによる研究も合せ、一般に電子的に励起された反応が圧力や LET にはあまり左右されないで、LET の増加によってラジカル同志の反応が増すことが知られた。また自由基やイオンのスクベンジャーの使用は、核分裂トラックにおいては無益であることもわかった。なお窒素固定の効率率は、CO-N₂ 系が最も大きく、含有 N₂ が 95% のとき最大である。これに対し H₂-N₂ 系では半分の効率である。

化学炉：このようなフィジョ化学反応のための化学炉は、図 3 に示した略図で察せられるように反跳エネルギーを化学エネルギーによく転換できるように仕組みられている。

化学炉によると燃料要素の放射線や反跳による破損が比較的少く、放出エネルギーの大きな利用ができ、現在の炉のように大きな損失が考えられない。しかし燃料の形状は、自己吸収を少なくするために必然機械力が弱くなる点は研究の余地がある。

図 3 では、(a)、(b) 2 様の例を示したわけであるが、

表2 化学炉の一例

G_{HON}	分子/100 eV	5
熱出力	MW(t)	1200
窒素流	kg/hr	3,506,424
メタン流	kg/hr	220,462
セニイ作用面積	m ²	193.5
炉心直径	m	3.23
炉心高さ	m	3.23
B部間隔	cm	15.7
要素数		381
単位セル中容積%		
水		15.11
燃料セニイ (実体2.5%ポイド97.5%)		0.71
ポイド (ガス, スチーム通過)		84.18
装荷ウラン-235	始	737kg
	終	500kg
	バーンナップ	32%
K_{eff} (N, 構造材, 可燃毒を含まず)	始	1.250, 終1.19
K_{eff} (同 を含む)	始	1.06, 終1.00

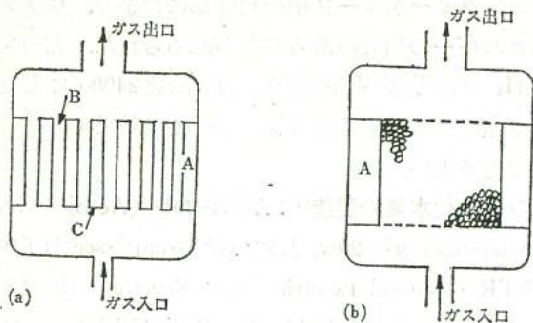
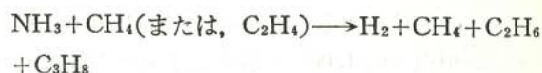
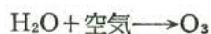
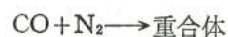
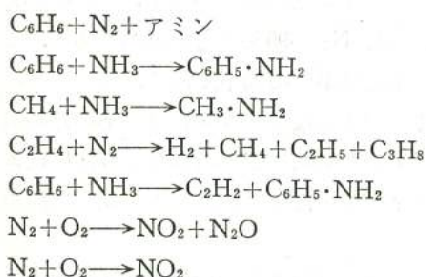


図3 フィシオ化学炉
(a)減速剤冷却炉
(b)反応流体冷却炉

いずれも反応のガスと燃料がよく接触するようにしてある。すなわち、(a)ではAの反射材にとりかこまれて、C部がB部を介在して設けてある。C中には加圧水を通し熱を持ち去るようしてあり、冷却と中性子の減速を兼ねている。B中には先述のセニイ状のセラミックス燃料、すなわち $Al_2O_3-UO_2$, ZrO_2-UO_2 , U_3O_8 または Ni 上に UO_2 コートしたもの、いずれも半径5ミクロン程度のセニイとして充填しておく。この層の中に反応ガスが通過し、反跳エネルギーを受けとるわけである。(b)の型では、 UO_2 などの経約20ミクロンの球を数個合せた塊を反射材の筒の中に充填してある。反応が吸熱性であるような系に適している。これらは、いずれの型でも、反応生成物と共に核分裂生成物は持ち去られ、とくに ^{135}Xe や ^{131}I などは停滞しないから、使用の傍ら燃料再処理の一部の目的は達しているわけである。生成物の放射能汚染除去は比較的簡単なものが多く、製品への影響はさほど問題にならない。

いま(a)型の一例についての仕様例を表2に掲げて見よう。

他のフィシオ化学反応：上に紹介したヒドラジン、シアン化水系の製造系のほか、次のようなものが調べられている。



以上のような次第であるが、原子力利用の放射線化学として今後、わが国でも発展する方面と思われる。

引用文献

- 1) J. H. Cusack, A. King, AGN-8198, Vol. I, II (1968)
- 2) General Motors Corporation Report, Np, ENR-3741, Allison Division, June (1964)
- 3) Aerojet-General Nucleonics Report AN-1377, Jan. (1965)
- 4) R. P. Hammond, Nucleonics, 23, No. 9, Sep. (1965)
- 5) P. Hartek, S. Dondes, Nucleonics, 14, No. 7, 22 (1956)
- 6) S. Kahn, F. R. Standerfer, AGN-8137, Vol. I (1965)
- 7) J. C. Wipple et al, AGN-8137, Vol. II (1965)
- 8) J. H. Cusack, 第8回日本アイソトープ会議論文抄録集, p. 177 (1967)