紙・パルプ工業と原子炉*

A. L. Lindsay, Jr.**

竹 野 万 雪 訳***

〔筆者紹介〕

1925年生まれ。1950年カリフォルニア大学で B. S. および M. S. を取得。1954年オークリッジ原子炉学校卒業。アイダホ州アイダホ・フォールズの工業材料試験炉 (ETR) の建設に参加。1954年カイザー・エンジニアーズ社に入社し、アルゴンヌ国立研究所に転出。沸騰水型原子炉および高速中性子の開発のための研究に従事。その後カリフォルニア大学放射線研究所およびカリフォルニア研究開発会社の計画に従事。米国原子力委員会の計画には、水溶液および高温プロセスの研究を行った。1957年9月、伊藤忠商事株式会社とカイザー・エンジニアーズ社が日本における原子力開発について提携したのを機に来日。カイザー社東京事務所支配人となる。

はじめに

紙・パルプ工業に原子炉が応用できるかどうかについてお話を前に、簡単に原子炉開発の歴史と現況を申し上げておきたい。原子力の分野は非常に広汎なものであるからこの小論の主題に合致するように、原子炉をプロセス蒸気および電力の生産に用いるための或る具体的な例について少し詳細に述べてみようと思う。

原子炉技術の推移

1. 研究用および試験用原子炉

基本的な原子炉に関するデータと、材料に対する放射線の効果を知るために、最初に運転された原子炉は研究用原子炉と呼ばれるものであった。最初のものはテネシー州オークリッジに建設された X-10 と呼ばれる原子炉で、1943年に運転開始され、現在でも稼動している。それに引き続いて非常に多くの研究用原子炉が建造され、現在でも建造中のものもあって、基礎的な核的データや経験の集積に一役買っている。原子炉の構造物や部品の放射線損傷に関する知識を得るためには、十分な大きさの試料や原子炉部品を照射するような高中性子束領域の大きな空間をもった高中性子束原子炉が必要である。高中性子束炉の中でこのような試験は進歩した原子炉施設の開発には不可欠のものである。最初の試験炉は材料試験炉 (MTR) と呼ばれるもので、1952年運転開始された。現在最も強力な試験炉は 175MW の工業材料試験炉 (ETR) で、

始動は1957年であった。ETR は最大 $9'' \times 9'' \times 36''$ に達する照射空間を炉心の中に数多く有し、全中性子束は、平均 $2 \times 10^{15} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{sec}$ である。

2. 実験沸騰水型原子炉

或る特定の型の動力炉を開発するに当たって、たいいていの場合それと同型の、小型実験炉をつくってみるのが通例となっている。約 6, 7 年前、いくつかの型の実験炉がそれぞれ建設され運転に入った。これらの実験炉というのは、PWR (アイダホにおける潜水艦用原型炉)、BWR 型 (アイダホにおける BORAX と呼ばれる一連の実験によって代表されるもの)、水均質炉 (テネシー州オークリッジの HRE によって代表されるもの) などである。

3 年程前、最初の発電用のガス冷却・天然ウラン・黒鉛減速型原子炉 (いわゆるコールドハーホル原子炉によって代表されるもの) が運転開始された。液体有機物を冷却材と減速材に使おうというアイデアを生かした実験炉もアイダホで運転され、満足以試験が行われている。またナトリウム冷却・黒鉛減速型熱中性子炉の原型も運転されている。

3. 原子炉開発の現況

上述のような原子炉や、それ以外の原子炉によって得られた経験から、現在ではいくつかの型の原子炉は十分実用性を証明したと考えられている。たとえば、加圧水型原子炉、沸騰水型原子炉、ガス冷却型原子炉、有機減速型原子炉などは十分証明されている。もちろんこれらの設計にはいろいろな設計者が持ち込んだ多くのヴァリエーションがある。

更に進歩した型の原子炉と考えられるものは高速中性子炉、水均質炉および重水使用の原子炉である。

現段階において上述のいろいろな型の原子炉は、出来上りと燃料の寿命を保証した形で固定価格方式の入札制で建造させることができる。したがって、これらの型の原子炉は実験段階を終了していると考えられることができる。もとより進歩改良は絶えず行われているけれども。

動力炉の効用

1. 発電専用

原子炉は大規模な中央発電所だけでなく、場合によ

* 原稿受付 24. 4. 8

** カイザー・エンジニアーズ社原子力開発部東京事務所支配人

*** 伊藤忠株式会社原子力部

っては小規模な発電所においても発電のために用いることができる。このような発電炉の効用の1例は、燃料が容易に得られないような遠隔地において動力を得ようとする場合に用いられる小型の原子炉である。たとえば、この種の原子炉は北極地方に建造されるであろうし、或る場合には電力だけでなく暖房用の熱源ともなり得よう。種々の型の原子炉はそれぞれ異った特性を持っているから、或る型の原子炉は大規模な施設にふさわしいであろうし、また或るものはどんな規模の要求に対しても容量を変えればうまく適合するといったものもある。

2. 電力とプロセス蒸気両用

工業地帯であろうと遠隔地であろうと、工業施設のために電力とプロセス蒸気を生産するための原子炉は、世界中の多くの場所で、経済的に採算がとれるといえる。このことは、工場が大量のプロセス蒸気と電力を消費し、しかもそれが燃料費の高価な地域にある場合にはなおさら真実である。このような原子炉施設は多くの産業に応用でき、就中紙パルプ工業などは最も応用に適した1例であろう。

3. プロセス蒸気専用

この原子炉は前項のものと同様、プロセス蒸気も必要とするどんな大きな規模の需要家にも適用できる。

4. 推進用

潜水艦や商船や航空機推進用の原子炉は、現段階においては実用化されているか或いは開発の進んだ段階にある。更に鉄道の機関車や、その他の大きな乗物の原子力推進の研究が進められている。

5. その他の応用

原子炉のその他の分野への応用は現に提案されているものもあり、計画されているものもある。たとえばナトリウム冷却炉から出る放射性ナトリウム冷却材を放射線源として用いることによって物質の照射をすることができる。この場合、冷却材を放射線源として用いることは、本来の原子炉の目的——発電——の副産物とみなすことができる。

発電用原子炉の経済性

発電のための原子炉の開発の初期——いくつかの型の実験原子炉が運転されはじめた頃——には、実用規模の発電用原子炉の予備設計が多くなされていた。これらの研究の目的は、技術的にみても経済的にみても最も将来性をもっているのはどのような型の原子炉かを決定することにあった。初期のこのような研究段階にあっては、費用の見積に於いて非常に不完全な知識をたよりにしていたために、それらの見積は非常に

大ざっぱなものであり、しかも多くの場合楽観的に過ぎるような結論を示した。しかしながら、現在では、十分に検証された原子炉についての見積の信頼性は2, 3年前に比べて大いに改善された。というのは、検証済みの原子炉についてはその仕上りの保証と燃料の寿命の保証と共に、部品や装置のちゃんとした入札価格が得られるようになったからである。このことは何を意味するかというと、現実に原子炉を使ってみようと使用する者が、自分の工場に原子炉を設置するにあたって経済的な可能性を検討したいという時に、確実な経済性の資料に基いて研究ができるのである。この種の経済性の評価に関しては、在来燃料の代りに原子力利用を推薦する場合には、将来の費用軽減の不確実な希望ではなく、現実の諸条件に基づくべきであり、またそうすることが可能になっているのである。

過去2年間、カイザー・エンジニアーズ社は原子炉を工業用プロセス蒸気および電力生産のために利用するに際しての見通しについて、いくつかの技術的・経済的研究をする機会を得た。ここで、これらの研究のうち、3種の研究について少し詳細に述べてみよう。

(1) 軽水型原子炉 最初の例は、遠隔地においてボーキサイトをアルミニウムに転換するための工場に、プロセス蒸気用原子炉あるいはプロセス蒸気と電力生産用原子炉を使うことである。この研究のために2つの場合が考慮された。

第Iの場合は115psiaの飽和蒸気を毎時300,000ポンド必要とする場合である。

第IIの場合はこのプロセス蒸気の他に、正味電気

第1表 原子炉データ

	第Iの場合	第IIの場合
原子炉型	BWR	PWR
熱出力 kW	95,000	106,000
正味電気出力 kW	—	10,000
プロセス蒸気発生率 lb/hr	300,000	300,000
原子炉中の燃料 kg	5,600	5,500
初期の濃縮度 (U-235) %	1.8	2.3
総燃料インベントリー kg	10,500	8,500
照射率 MWD/ton	6,000	10,000
被覆材	Al-Ni合金	ジルカロイ-2

第2表 燃料費 (単位: ¢/MBTU)

	第Iの場合	第IIの場合
核分裂性物質	8.5	8.2
加工費	32.3	32.2
再処理費	9.5	6.0
燃料使用費 @ 4%	2.7	3.0
正味燃料費合計	53.0	49.4

* 稼働率95%, プルトニウム・クレジット \$ 12/gm とする。

第3表 年間運転費*

			第Ⅰの場合	第Ⅱの場合
資 本 費			\$ 1,050,000 (\$ 7.0×10 ⁶ @ 15%)	\$ 1,750,000 (\$ 11.7×10 ⁶ @ 15%)
	燃 料 費		1,430,000	1,480,000
	運 転 諸 経 費		300,000	400,000
年 間 総 費 用			\$ 2,780,000	\$ 3,630,000

* 稼働率 95%とする。

出力 10,000kW を要求する場合である。

これらの研究の結果は第1表、第2表、第3表にまとめてある。

第Ⅰの場合の例に用いられている原子炉は軽水沸騰水型原子炉であり、第Ⅱの場合は軽水加圧水型原子炉が用いられている。原子炉構成品の価格見積は主要な部品製造業者から得ており、用いられている原子炉型は十分検証されたものであるから、この経済性の分析のまったく信頼性のあるものと考えてよい。しかしながら、この費用のデータは或る特定の適用例と設置地点のみに適合するのであって、必ずしもこれと異なる適用例には合致するものではないことに注意しなければならない。第Ⅰの例の場合、これはプロセス蒸気だけを生産するものであるが、軽水沸騰水型原子炉は固定費と運転費とを含めて 100万 BTU あたり 1.04ドルで蒸気を生産する。プロセス蒸気と電力を生産する第Ⅱの例の場合、軽水加圧水型原子炉が、副産物としての電力をキロワット時あたり 10 ミル (3円 60銭) で生産する。これら両者の場合のプラントのブロックダイアグラムを第1図および第2図に示しておく。どちらの場合もコンテナ内部の施設は単に在来の蒸気発生源と原子炉施設を置き換えたものに過ぎず、出てくるプロセス蒸気は放射性ではなく、在来のプロセス蒸気と同様に安心して使うことができるということを銘記して頂きたい。定常的な燃料の補給を必要とする在来燃料のボイラーと比較して、原子炉の場合は1年ないし2年間、燃料の取換なしに定常的に蒸気を生産

第1図 プロセス蒸気プラント (第Ⅰの場合)

第2図 プロセス蒸気および発電用プラント (第Ⅱの場合)

することができる。

(2) 重水型原子炉 次に簡単に述べておきたい例は、プロセス蒸気と電力生産用の重水沸騰水型原子炉である。重水沸騰水型原子炉は先に述べた軽水使用の加圧水型および沸騰水型原子炉に比べてあまり開発がすすめられていないが、かなりの研究がなされ、またアルゴンヌ国立研究所の EBWR (実験沸騰水型原子炉) は軽水沸騰水型としても、重水沸騰水型としても運転できるように設計されている。

カイザー・エンジニアーズ社は米国原子力委員会との間に原子力研究協定を結んで以来ずっとこの型の原子炉について研究している。というのは、この型の原子炉は低廉な燃料費で済むことが約束され、天然ウラン燃料を使用する可能性をもっているからであり、この事実は濃縮ウランの供給源を持たない国々にとっては魅力があるであろうからである。このプロセス蒸気および電力用重水沸騰水型原子炉の研究は、天然ウランを燃料として使用した熱出力 200MW の原子炉を採り上げ、115psia の軽水プロセス蒸気を毎時 175,000 ポンドと、正味電力 30MW を生産しようとするものである。この原子炉の設計データを第4表に示す。またこの特殊な応用に際しこの費用に関するデータを第5表および第6表にあげておいた。

重水炉の資本費は、軽水使用の加圧水型炉あるいは沸騰水型炉に比べてより高いが、一方燃料サイクル費についていうと、軽水炉では濃縮ウラン燃料を使わなければならないので、天然ウランが使える重水炉のほうが安い。この原子炉で生産されるプロセス蒸気の総原価は100万BTUあたり88セント、電力原価は1kWhあたり 14 ミル (5円 4銭) となる。この原子炉型のいろいろなやり方についてのフローシートを第3図、第4図、第5図に示しておく。

第3図において、重水蒸気はタービンに使用され、その一部は蒸気発生器に送られ、軽水蒸気を発生させ

第4表 重水沸騰水型原子炉の設計データ

運 転 条 件	原子炉熱出力	tMW	200
	プロセス蒸気発生率	lb/hr	175,000
	総電気出力	eMW	32
	正味電気出力	eMW	30
	稼働率(推定)	%	90
	熱流束(平均)	BTU/hr・ft ²	120,000
	熱流束(最高)	BTU/hr・ft ²	300,000
	出力密度	kW/liter	10.5
	蒸気ドーム内圧力	lb/in ² (abs)	250
	プロセス蒸気圧力	lb/in ² (abs)	115
炉 心	循環率(強制)	gal./min.	20,000
	タービンへの重水蒸気流量	lb/hr	420,000
	蒸気発生器への重水蒸気流量	lb/hr	184,000
	1サイクルの期間	日	420
	減速材および冷却材	燃料	重水(D ₂ O)
	燃料装荷量	metric ton	19
	直径	ft	9.5
	高さ	ft	9.5
	反射材	重水(D ₂ O)	
	反射材の厚さ	ft	1.25
制 御 棒	格子の形状		3角形
	格子空間	in	8
	燃料被覆		Al-Ni 合金
	燃料集合体の数		200
	燃料集合体の型式		平板
	1燃料集合体あたりの平板数		6
	平板の厚さ	in	0.23
	数		21
	寸法	in	3(幅)×114(長)
	形状		Y字形
重 水	炉中のインベントリ	ton	45
	発電所、蒸気発生器内のインベントリ	ton	7
	年間損失	%	3
核 物 理	燃料照射率	MWD/ton	4000
	初期転換率		0.88
	減速材と燃料の体積比		17

第5表 年間費用と単位費用*

内 訳	比 率 %	年間費用 \$ 10 ⁶	単位費用セン ト/10 ⁶ BTU
資 本 費 (\$13.7×10 ⁶)	15	2.05	38.1
重水インベントリ (\$3.2×10 ⁶)	12	0.38	7.1
重 水 損 失 (年間 3 %)	—	0.10	1.8
正味燃料サイクル費	—	1.13	21.0
賃 金 お よ び 検 査 費	—	0.53	9.8
所 得 税 お よ び 利 潤	—	0.07	1.4
保 守 費 お よ び 経 費	—	0.11	2.0
必 要 経 費	—	0.06	1.1
保 險 費	—	0.17	3.2
一 般 管 理 費	—	0.13	2.4
合 計		4.73	87.9

* 年間熱生産率は稼働率 90%として次のようである。

電力 (2.36×10⁶ kWh) 3.77×10¹² BTU
 プロセス蒸気 1.61×10¹² BTU
 合 計 5.38×10¹² BTU

第6表 燃料 サイクル 費

	ド ル (ウラン 1 kg あたり)	セン ト (10 ⁶ BTU あたり)
償 却 費*	1.9	0.6
加 工 費	20	6.1
処 理 費	31.7	9.7
輸 送 費	7.2	2.2
燃料インベントリ**	1.6(年間)	1.0
加工インベントリ**	2.4(年間)	1.4
合 計		21.0

* 減損ウランとプルトニウム・クレジット (\$12/gm) を含む。

** 燃料インベントリは、加工および処理のインベントリを含めて 32 トンであり、稼働率は 90%と仮定した。

る。

第4図は発電をせずに、プロセス蒸気だけを生産する場合のフローシートである。

第5図は蒸気発生器でつくられた軽水蒸気が電力とプロセス蒸気の両方を生産する場合のもので、二次回路には重水もなければ、放射能もない。

紙パルプ工業用原子炉

1. 2つの研究例

さて、ここでいよいよ私たちが行って来たこの面での研究に基づいて、日本の紙・パルプ工業向のプロセス蒸気および電力のための原子炉について述べよう。私たちは個々の要求にかなうよう、凝縮プラントと非凝縮プラントの2通りのシステムを考えた。両方とも正味電気出力 10,000kW を得るためのものであるが、蒸気発生量を異にする。これらの分析を示すと次のようになる。

第Iの場合：凝縮プラント(第6図)

i) 基本的分析：蒸気需要量は圧力

記号
 M=1000 ボン/時
 F=°F
 P=ポンド/平方インチ (abs)

第3図 プロセス蒸気および発電用重水沸騰水型原子炉

第4図 プロセス蒸気用重水沸騰型原子炉

第5図 発電およびプロセス蒸気用閉回路重水沸騰型原子炉

2kg/cm²で毎時29.4トン、圧力10kg/cm²で毎時12.6トン。電力需要は10,000kWとする。以上の要求を満たすために必要な原子炉出力は、熱出力にして67MWと算出された。

ii) 資本費見積：原子炉および蒸気発生施設をあわせて400万ドル（熱出力1kWあたり60ドル）。タービン発電機設備が110万ドル（電気出力1kWあたり100ドル）。合計510万ドルとなる。

年間償却費は耐用年数を17年として30万ドル。年間電力生産量は稼働率を90%として78.8×10⁶ kW。年間プロセス蒸気生産量は595,000 MBTU。

iii) 電力および蒸気の年間生産額：この計算を行うためには、現行蒸気価格を1MBTUあたり1.38ドル（トンあたり900円）、電力価格を1kWhあたり16.6ミル（6円）と仮定した。そうするとプロセス蒸

気は

$$\$1.38 \times 595,000 = \$821,000/\text{年},$$

電力は

$$\$0.016 \times 78.7 \times 10^6 = \$1,308,000/\text{年}$$

となり、合計2,129,000ドルとなる。

iv) 原子炉を使った施設の運転費：これは資本費、燃料費、運転および保守費よりなる。資本費は減価償却費も含めて815,000ドル、燃料費は900,000ドル（1MBTUあたり50セント）、運転および保守費180,000ドル（1MBTUあたり10セント）となり、合計1,895,000ドルとなる。

v) 原子炉を使うことによる純利益：これは電力および蒸気の生産額と原子炉施設の運転費の差額であるから、
 $\$2,129,000 - \$1,895,000 = \$234,000$
 すなわち年間84,200,000円の利益となる。

第IIの場合：非凝縮プラント（第7図）

i) このプラントの正味電気出力は第1の場合と同様10,000kWであるが、プロセス蒸気はもっと多く、圧力2kg/cm²で毎時86.1トン、10kg/cm²で毎時12.6トンを生産するものとする。これに要する原子炉の熱出力は54,700kW、加熱のための出力は11,800kWで、合計66,500kW（熱）を要する。

ii) 資本費見積：原子炉は385万ドル（熱出力1kWあたり70ドル）、過

熱器（石炭または石油だき）50万ドル、建物およびその他の施設120万ドル、発電所100万ドルで、合計655万ドルとなる。

iii) 蒸気および電力の年間生産額：プロセス蒸気は1MBTUあたり1.38ドルとして、1,930,000ドル、電力は1kWhあたり16.6ミルとして1,308,000ドル、合計3,238,000ドルとなる。

iv) 施設の年間運転費：資本費1,050,000ドル、原子燃料費（年間1.48×10⁶ MBTUとして）888,000ドル（1MBTUあたり60セント）、過熱器のための石炭または石油（年間0.32×10⁶ MBTUとして）259,000ドル（1MBTUあたり81セント）、運転および保守費180,000ドル、合計2,337,000ドルとなる。

v) 原子炉を使うことによる純利益：
 $\$3,238,000 - 2,377,000 = \$861,000$

すなわち1年で8億円の利益となる。

2. 価格の見積

上に述べた2つの例の分析における資本費の見積は、アメリカでの実際の建設例に基づいて行われたものであるから、まったく信頼のおけるものとみてよい。原子燃料費についてはアメリカ国内の価格に基づいているが、輸送費などの追加費用は含まれていない。

2つの例のうち、第Ⅱの場合には、過熱器の燃料として普通の燃料（石炭または石油）が使われると仮定しているが、コールタールなどの副産物の廃棄物などをこのような過熱器で燃焼させれば、全体としての燃料費は更に低下するであろう。

この研究において、通常の方法でつくられるプロセス蒸気と電気の日本におけるコストとして仮定された数字は、もとより地方によって異なるであろう。だからここで挙げたコストに関する数字はすべての設置場所にあてはまることではないであろう。

む す び

今まで述べた3種の研究は技術的並びに経済的な実行可能性の例として挙げたもので、こういう研究は施設の所有者がその施設に原子炉を蒸気と電気の生産のために利用するかどうかを決定する以前に行うべき性質のものである。カイザー・エンジニアーズ社は、この分野における経験ある会社として、この種の施設の設計・建設への1つの段階として、日本向けの研究を更に進める用意ができている。

最後に2,3の結論を挙げておこう。

1. 原子力は日本の電力産業と同様に、或る種のプロセス蒸気と電力の工業利用において“現在”でも日本において競争力をもっていると思われる。したがって原子力は施設の拡張計画に際して、通常の燃料とどちらが経済的であるかを検討し比較されるべきではないかと思われる。

2. 核分裂現象が発見されてから20年も経過しており、その間に原子力の利用についておびただしい努力が費されているのであるから、原子力というものが

第6図 第Ⅰの場合：凝結プラント

第7図 第Ⅱの場合：非凝結プラント

何か目新しい、まだ確証の得られていないものだと考えるべきではない。いくつかの型式の原子炉は現在十分検証されたものとなっている。

3. 原子炉の改良は引き続き行われているけれども、その改良変更は主として炉心部分に関するものだけである。したがって、現在つくられた原子炉でも、燃料が一度燃え切った後でも炉心だけを取り換えれば進歩改良に追いつくという利点をもっている。たとえば、いくつかの原子炉では、今なお行われている設計上の改良のために、2度目の炉心は最初に設置した炉心よりもかなり安い燃料費ですむようになるだろう。シッピングポートの PWR とか EBWR などがそうである。