

## 海外における核燃料サイクルの現状

## Present Status of Nuclear Fuel Cycle Overseas

小 泉 益 通\*

Masumichi Koizumi

## まえがき

核燃料サイクルに関しては、今迄多くの人が述べてきたが、今回は著者が偶々本誌に投稿する機会を与えられたので、OECDの原子力機関の活動の内容をまじえて、海外の現状を述べてみたい。

OECDの原子力機関(NEA)は、今迄核燃料サイクルに関する活動として、主にウラン資源の探鉱、資源の予測、ならびにウランの製錬等に関する技術の調査や、各国の原子力発電計画とこれに必要な核燃料の需要と供給、更に使用済燃料の再処理容量の調査等を進めてきた。これらは、一般に謂われているRed-Book, Yellow-BookとしてNEAが出版して来たものである。然し乍ら、世界的な経済不況と、今一步原子力産業の進展が思わしくない状況を憂慮し、NEAは一昨年より原子力発展をさまたげている問題を調査検討し、関係国の政策決定者に有利な判断が与えられるよう、又原子力の発展に有利になるように、何をすべきかを一昨年より一年間を通して、検討してきた。これらの内容をまじえて述べてみたいと考える。

## 1. OECDのNEAの活動

昨年はじめ、前述したように、原子力の発展に関して、現在及び将来何が問題になっていて、何が解決されるべきかについて、検討してきた。検討された項目は、次のようなものである。1) 核燃料サイクルの経済性。2) 原子力産業の実現性。3) 遠隔操作技術。4) 改良型燃料の利用。5) 濃縮。6) 核燃料サイクルのバックエンド。7) 使用済燃料の管理。8) デコミッションング等である。これらのうちでNECの運営資金及び職員の数に限界もあり、又各国の政策等に微妙に影きょうするような問題は削除され、新しくNEA

の取り上げるべき、新しいテーマとして、次のがえらばれた。1) 核燃料サイクルの経済性。2) 遠隔操作技術。3) 使用済燃料の管理。4) デコミッションング。

これらのテーマは、特に核燃料サイクルに関する、未解決な分野と問題を含んでいる分野である。これらのテーマは、昨年中に決定され、すでに作業に入っているものもあり、これらについて述べてみたい。

## 2. 核燃料サイクルの経済性

NEAは、この問題を取り上げる前に、原子力発電コストの優位性を石炭と比較しており、この中で核燃料サイクルの発電コストに占める割合、更にサイクル中の夫々のプロセスの占める割合と傾向を明らかにしている。

## 2.1 原子力と石炭による発電コストの比較

軽水炉の原子力発電については、各国とも努力の成果がみゆり、稼働率も70%台にも上昇し、安定した運転を行っている。現在の原子力発電の大きな魅力は云う迄もなく、発電コストの安さにある。石油、水力、石炭、原子力の順であり、石油に比較し、著しく安い。これが現在のところ原子力発電の発展を支えている重要な利点であるが、これが石炭とどの位の差があるのか、又内容的にみてどの位安心出来るのかは、大変重要なことである。この点について、昨年NEAの各国に調査を依頼した結果が明らかになったので、その概要を述べてみたい。

まず、対象になる原子炉と、稼働をはじめる時期であるが、これは、1990年に稼働するLWRを対象にし1981年の1月のコストにおきなおしたもので、100万kWeの原子炉を対象にしている。又この原子炉の条件は各国とも非常に巾を有しているので、一概に比較が簡単になされるものではなさそうである。即ち夫々の国で計算するために用いられた経済的パラメーターが夫々異っているからである。念のためにこれらの条件を

\* 動力炉・核燃料開発事業団技術管理部長  
〒107 東京都港区赤坂1-9-3 三会堂ビル

表1 発電コストの比較<sup>1)</sup>

Discount rate 5%

10<sup>-2</sup> ECU per kWh at January 1st 1981

Country	NUCLEAR				COAL				Ratio Coal Nucler
	Invest- ment	O&M	Fuel	Total	Invest- ment	O&M	Fuel	Total	
Belgium	1.26	0.57	0.68	2.51	0.59	0.32	2.59	3.50	1.39
France	1.02	0.36	0.69	2.07	0.83	0.29	2.50	3.62	1.75
Germany, F. R. a)	1.58	0.47	0.82	2.87	0.79	0.60	3.32	4.71	1.64
Italy	0.99	0.22	0.78	1.99	0.56	0.19	2.38	3.13	1.57
Japan	1.34	0.47	0.76	2.57	0.95	0.42	2.51	3.88	1.51
Netherlands	1.61	0.37	1.02	3.00	0.79	0.41	2.68	3.88	1.29
Norway	1.26	0.44	0.78	2.48	0.82	0.43	2.27	3.52	1.42
Sweden	1.75	0.45	0.85	3.05	0.84	0.49	2.74	4.07	1.33
United Kingdom b)	2.85	0.34	0.93	4.12	1.73	0.35	3.82	5.90	1.43
United States c)	1.85	0.37	0.67	2.89	1.03	0.37	1.52	2.92	1.01

Note - The figures for different countries are not directly comparable-see cautions in main text.

- Shaded columns extracted from UNIPED (ref. 1).

- Excluding taxes and similar charges.

a) Fuel cost coal based on 50% domestic and 50% imported coal.

b) Data from CEBG Sizewell Case.

c) Mid-case projection for Chicago region (mid-west or mid-continent region. See Annex 3 for other regions). The investment component for nuclear and coal plants includes a cost to refurbish and/or rebuild major equipment, a so-called "interim investment", in the 15th year of operation.

示しておこう。(表2)

表3に示す各国のデータは、表2に示す条件の下で計算されたものであるが、この値を真正直に受け取ることは少々無理があり、ほゞこの傾向であろうと云う程度に受け取る必要がある。コストの単位として、ECUを用いているが、これは、European Currency Unitであり、1990年に稼動するものを、すべて1981年の1月現在でのコストに計算しなおしたものである。IECU per kWhは、1981年の1月で、約1\$にしている。従って、この表に示されている夫々の数に1\$×10<sup>-2</sup>を乗じたものが実際の値に近いと思われる。

これらの表等から、見解をまとめているが、要約すると次のようになる。

1) ヨーロッパ、日本、中央カナダでは、原子炉の資本費の50%増加、燃料サイクルコストの2~3倍の高騰、或いは原子炉の稼動率が50%位に低下しても原子力の経済的優位性は保たれるであろう。

2) 原子力と石炭火力発電のコスト比は、炉の資本費に大きく依存している。この資本費は、建設時のリードタイム、複数の原発で同一設計を用いていることが出来るか、又同一サイドに立地できるかが、コストに相当の影響を与える。又プラントの稼動率も重要な

要因である。

3) 全体的な核燃料サイクルのコストの変動が、石炭火力発電コストとの比較に与えるインパクトは相対的に小さい。一般に各国は、今後30年間にわたり、核燃料サイクルコストについて、有意なコスト上昇があるとは考えていない。しかしコストの相対的關係は、化石燃料の価格に敏感で、ヨーロッパではこの相対的關係比は年に1~2%で上昇している。若し、将来石炭の価格が一定に据え置かれ得るならば、原子力の優位性は減少することになる。

## 2.2 核燃料サイクルコストについて

各国の核燃料サイクルに関するコストについては、昨年早々から調査検討が進められ、昨年末にひとまず概要が明らかにされたものである。然し、現在更に詳しいコストの評価が進められ、各国の調査結果が本年一月に集められ、その後各国の専門家等による評価検討結果が、年末迄には公表されると思われる。従って、現在迄の状況を述べることにしたい。(表3)

原子力による発電コストに占める、核燃料サイクルコストの割合は、表1から算出し得るが、その割合は、大体30%がほとんどで、英国、米国の場合は23%になっている。これらは、1990年頃に稼動するであろう軽

表2 ECONOMIC PARAMETERS USED IN NATIONAL CALCULATIONS<sup>1)</sup>

Country	Construction time years		Load factor %		Plant lifetime years		Discount rate %
	Nuclear	Coal	Nuclear	Coal	Nuclear	Coal	
Canada	—	3-4	—	75	—	28.5	4
Nova Scotia	—	5-6	—	70	—	30	
Alberta	—	—	—	—	—	—	
New Brunswick	7-8	—	1st y 75	—	40 c)	—	4
Ontario Hydro	7	—	2nd y 80	—	—	—	
	8-10	8-9	1st y 60	60	40 c)	35	3
			2nd y 70	70	—	—	
			3rd y 80	80	—	—	
France a)	6	4	1st y 46	46	21	25	9
			2nd y 61	61	—	—	
			3rd y 61	65	—	—	
			4th y 71	70	—	—	
			5th y —	75	—	—	
Germany, F. R.	6	5	—	—	20	—	4.3
Italy	6.5-7	5	1st y 34	34	25	25	5
			2nd y 57	57	—	—	
			3rd y 75	75	—	—	
Japan	6	3	—	—	—	—	—
Netherlands	7	5.5	—	—	16 d)	15 d)	—
Norway	7	5	1st y 55	70	25	25	4.3
			2nd y 60	80	25	25	7
			3rd y 65	—	—	—	
			4th y 70	—	—	—	
Sweden	8-9	8-9	1st y 55	70	25	25	4
			2nd y 60	80	—	—	
			3rd y 65	—	—	—	
			4th y 70	—	—	—	
United Kingdom	7.5	6.7	1st y 27	30	35	40	5
			2nd y 53	60	—	—	
			3rd y 60	67	—	—	
			4th y 64 d)	72	—	—	
United States	7.8	4.5	—	65	30	30	Pretax 4.3 After tax 1.9

a) Load factors are applied after first coupling to the grid; commercial operation starts four month after coupling.

b) The 64% for the Sizewell PWR equilibrium load factor is expected to increase to 70% for subsequent stations.

c) Amortisation period. Interim replacement costs for refurbishing after 20 years added to the capital cost.

d) Financial life (amortisation period).

水炉を対象としている。ここから云えることは、将来核燃料サイクル費の占める割合が、30%附近に増加している。原子炉については、各国では標準化や、コストの低減化に努力しているが、一方核燃料サイクル分野では、更に開発すべき分野が残っており、核不拡散問題にからむ保障措置、放射線防護にからむ安全性が強調されれば、更に幾分コストの上昇はあり得るだろう。

核燃料サイクルの夫々の分野に於ける夫々のコストの占める割合の傾向は、表3から計算すると、大体の傾向として再処理+廃棄物の貯蔵：40%~45%、燃料加工：8%~12%、濃縮：20%~26%、UF<sub>6</sub>への転換：1.3%~2%、供給されるウラン：20%~25%となる。フランスと英国の例を挙げると、再処理+貯蔵：≒43% (仏)、≒41% (英)、燃料加工：≒9% (仏)、≒8% (英)、濃縮：≒26% (仏)、≒26% (英)、UF<sub>6</sub>への転換：≒2.3% (仏)、≒2.1% (英)、供給されるウラン：≒21% (仏)、≒23% (英)である。燃料加工、濃縮、転換等は開発努力や、規模・拡大によりコストの減少は期待し得るが、再処理及びそれ以降のコストが問題であり、やはり一番コスト高のところになって

いる。夫々の分野での実際のコストは、表3からECU = \$ = 230円とすると、再処理+廃棄物貯蔵費は15万円~20万/kgU (仏：20.1万円/kgU、西独：19.7万円/kgU、英：15万円/kgU)、燃料加工費は、3万円~5万円/kgU (仏：4.1万円/kgU、西独：5.4万円/kgU、英：3万円/kgU)、濃縮費は、2万円~3万円/kgSWU (仏：2.8万円/kgSWU、西独：2.2万円/kgSWU、英：2.3万円/kgSWU、米：2.3万円/kgSWU) 等である。

以上のように全体的な傾向を述べたが、これに更に補足説明を加えると、1.全体的に似たような傾向を示している。但し、各国は夫々の算出仮定を著しく伏せていると思われる。2.ヨーロッパの国のほとんどが、5年間冷却後再処理としている。又高レベル廃棄物はガラス固化し、貯蔵するとしている。米はカナダと同様に、不明確な貯蔵を想定している。3.ウランの価格の上昇については、0.3~3%/年を想定している国がある。又燃料加工については、将来1.0~2.5%上昇すると想定している国があり(4~5ヶ国)、他は全般に変化なしとしている。4.再処理コストについては、商業ベースで評価したのは、英仏のみであり、他の国

表3 核燃料に関する価格<sup>1)</sup>

Country	Uranium Concentrates ECU/kgU		Conversion into UF <sub>6</sub> ECU/kgU		Enrichment ECU/kgSWU		Fuel Fabrication ECU/kgU		Reprocessing and Storage of Wastes ECU/kgU		Value of Pu ECU/g fissile Pu	
	Price at 1. 1. 81	Relative price change % year	Price at 1. 1. 81	Relative price change % year	Price at 1. 1. 81	Relative price change % year	Price at 1. 1. 81	Relative price change % year	Price at 1. 1. 81	Relative price change % year	Price at 1. 1. 81	Relative price change % year
Belgium	76.96	0	5.92	0	126.86	0	164.32	0	676.6	0	8.46	0
Canada	77	0	6.4 <sup>a)</sup>	0	—	—	31.4	0	19 <sup>b)</sup>	—	—	—
France	81:78.8 90:88.3	1981:0 1990:2	4.34	0	121.3	1981:-1 1990:0	177.5	-2% until & fimit of 115	875	0	1990:20.5 2000:26.5	—
Germany F.R.	70.2	0.48	4.6	0.48	95.3	-0.95	233.5	0	856.1	1.9	1990:8 2000:6.4	0.48
Italy	85.45	0	4.93	0	131.4	0	238.2	0	780.2	0	12.3	0
Netherlands	85	0	5.6	0	110	0	170	0	940	0	13.6	0
Norway	80.3	0	5.4	0	108.1	0	177.5 <sup>c)</sup> 154.4	0	849 <sup>d)</sup>	0	—	—
Sweden	90	1981:2.7 1990:2.5	—	—	89	1981:6.4 1990:2.5	140	1981:2.6 1990:2.5	700	1981:0 1990:2.5	—	—
United Kingdom <sup>e)</sup>	66	1981:3.1 1990:6.2 2000:3.1	6.1	0	98	1981:3.8 1988:2.3 2000:0	132	1981:3.8 1988:2.3 2000:0	650	0	—	—
United States <sup>f)</sup>	61	1981:1.7 1990:0	4.7	0	99.9	0	124.1	0	285.81 <sup>g)</sup>	—	—	—

Note - The figures in this Table are not necessarily directly comparable - see main text.

- Shaded columns extracted from UNIPED (ref. 1).

a) For UO<sub>2</sub>

b) 10 years storage is included in station capital and operating costs. The value of 19 ECUs per KgU is assumed to be paid in a sinking fund at 5% real to cover the subsequent costs of transportation, interim term storage and disposal (i. e., discounted value).

c) First cores/equilibrium cores.

d) Including credit.

e) Data from CEBG Sizewell Case.

f) Reprocessing and thermal recycle are not currently planned for large-scale application in the United States. Costs are therefore represented as for the "once-through" cycle. At the uranium and enrichment prices considered, total fuel-cycle cost estimates are comparable for the once-through and reprocessing/recycle options.

g) High level waste disposal cost.

はこれらの資料から評価計算したと思われる。5. CANDUは核燃料サイクルコストは安い、これは天然ウランを用いていること、又燃料設計が簡単であり生産性が良いこと等からきている。6. 仏は英よりも核燃料サイクルコストは高いが、発電コストは安くなっている。

### 3. 核燃料サイクルのこれからの問題

OECD-NEAに関連する国々は、核燃料サイクルのどこに目を向けているかと云うと、主に実現に定着している軽水炉の核燃料サイクルであり、特に再処理と再処理以降のプロセスである。

#### 3.1 使用済燃料の管理

昨年をはじめより、NEAの専門家が検討したのは、核燃料サイクルのコストの問題、又核燃料サイクルのバックエンドと使用済燃料の管理の問題点であった。軽水炉の核燃料サイクルに於いて、使用済燃料を再処理しない場合、又はする場合について、使用済燃料をなるべく早く再処理するか、或いは中間貯蔵を

し、長期間貯蔵してから再処理するかの場合について、技術的・経済的評価をスタートしている。この使用済燃料管理に関する各国の状況は次のような傾向である。

英、仏は現在のところ再処理に関しては、中間貯蔵を考える弾力性のある意向を示している。西独は、再処理を進めることについては今迄通りであるが、中間貯蔵・長期貯蔵の検討も進めている。米国は、1983年に制定した放射性廃棄物管理法にもとづいて、当面 On Site 貯蔵とし、これが無理の場合は政府が中間貯蔵施設を用意することになっている。カナダは、On Site 貯蔵を行っており、技術的には50年は貯蔵可能と考えているが、50年以上についての Wet と Dry Storage も検討を進めている。フィンランドも長期間貯蔵を検討中である。スウェーデンは、再処理を海外に委託する分は除いて、自国内に永久貯蔵を考えている。

#### 3.2 デコミッションング

この問題は、各国から特に興味を持って取り上げられたテーマである。核燃料サイクルのバックエンドにおいて最もあとまわしになったところであり、技術的

に可能なのか更にどの位コストがかかるのかが取り残された興味深い問題である。廃炉については本年早々から米国のSHIPPINGPORT炉が解体されることになっており、これは多分世界ではじめての大規模なケースであり、サイトは完全にもの状態にもどすことになっており、72ミリオンドル（≒170億円）の費用をみつもっている。この実験は今迄の解体等に関する未経験の分野を補って呉れるものと期待されている。英国は、すでに再処理プラントに関する完全解体のケーススタディを行っており、その結果、69ミリオンポンドの費用がかかるものとしている。又燃料製造施設についても今後検討を行う予定である。フランスはRemote Handlingによる解体技術を進めており、FBRラプソディーの解体作業の国際協力を提案している。このように各国では、積極的に進めており、これらが技術的・経済的から検討され調査の結果が、本年末頃迄にはまとめられることになろう。

### 3.3 各国の現状

フランス：昨年前半に、中期的エネルギー需要と原子力政策が明らかにされた。

イエローケーキの1982年の生産高は、6つの生産センター（生産容量3,900t/Y）を用いて2,860tに達した。今のところ新しい生産センターの構想も増設の計画もない。従って国の生産量は、3,900t/Yにとどまるだろう。U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>からUF<sub>6</sub>の転換量は、国内外の需要に答えて、COMURHEX Plantは11,000t/Y容量を有し、輸出の割合は世界市場の1/3に近づいている。濃縮については、FURODIF Plant (10.8million SWU/年)は現在稼働率を上げており、ここ数年70%の稼働率で操作する予定である。燃料加工については、PWR用加工プラントFBFCがあり、600t/Yの加工容量を持っている。又CFC (50%COGEMA, 50%FRAM ATOME)が500t/Yの加工プラントの建設を行っており、操業は昨年のもであった。再処理については、1982年には、UP-2プラントでGGNUの燃料の約230tを処理し、このうち約150tのLWRの燃料を再処理した。1984年から、UP-2プラントはPWR用燃料の再処理にのみ使用されることになり、その容量は約200tHM/年となろう。2つの新しいプラントUP-2-800とUP-3（現在建設中）は夫々800tHM/年の容量を有し、これが稼働するとLAHAQUE Complexの総量は1,600tHM/年に上昇するだろう。この時期は1990～1995の間と思われる。現在LAHAQUEでのStorage Pondsは使用済燃料の2,400tを入れ

ることが可能である。現在建設中或いは計画中のPoondの容量は、1900年迄に8,400tに増大する。高レベル廃棄物のガラス固化については、AVM(MARCO ULE Vitrification Plant)で、1982年に179個のガラス容器を生産したが、これは135立方メートルの核分裂生成物を処理したことになる。

西独：最初の間貯蔵施設(at GORLEBEN in SAXONY)の工事が1982年の4月にはじめられ1983年の末に完成した。2番目の中間貯蔵施設(at AHAUS in NORTH RHINE-WESTFALIA)の許認可手続がすでに開始されている。これに加えて、現在あるいくつかのプラントの中にコンパクトリグを取りつけるための認可があり、原子炉から出て来る使用済燃料を長期間なんとか適切に貯蔵することが可能になるだろう。ガラス固化については、高レベル廃棄物のガラス固化のための最初の原型プラント(PAMELA)の工事は、順調に進められており、最初の稼働は1985年の3月である。再処理については、比較的小型の再処理プラント(350tMH/Y)の許認可手続が順調に進められており、立地の場所は、BAVARIAか或いはLOWER SAXONYで、このいずれかの決定は1984年の春になされ、1985年に工事がはじまるだろう。この場合の容量は、まず350tHM/Yではじめて、最終には700tHM/Yと考えられる。濃縮については、西独ではじめての400SWUの濃縮プラントは、GRONANで1982年にスタートしている。廃棄物の処分については、5年計画による鉄鉱山(KONRAD)の調査によれば、原子力施設の解体による廃棄物及び低レベル廃棄物の最終処分にはここがもっとも適していることが明らかになった。従ってこの鉱山を1980年代の末迄に使用し得るように、最近許認可手続を開始した。岩塩鉱山(ASSE)は、以前には低中廃棄物の処分施設として用いられていたが、今や主に高レベル廃棄物処分に関する研究に意識的に用いられており、ここが廃棄物の最終処分に用いられるかどうかの調査が進められている。

英国：使用済のマグノックス燃料を溶解する溶解槽とセルが14年間も使用されて来たが、この容器に悪化のきざしが認められたので、調査すべく除染された。除染作業はうまく行き、作業員が入れる程度にまで除染された。その結果、新しい溶解槽に替える必要はないことが明らかになった。英国の再処理すべき燃料の量が減ったために、1982年の7月に使用可能になったTHORPの900tの分は、1983年6月にヨーロッパの電

力会社ですべて売却済みとなった。

米国：廃棄物に関して、1982年の放射性廃棄物法の実施について、DOEは、6つの州（ワシントン、ネバダ、テキサス、ユタ、ルイジアナ、ミシシッピ）の中からはじめての廃棄物貯蔵のための可能な場所を明らかにし、夫々公聴会を開いた。又DOEは、17の州（結晶状岩石を有する）の中で、初期的な地質学的研究をはじめた。これらの州は、今後の廃棄物貯蔵のための場所として、適していると思われる。DOEは、立地選定のガイドラインの仕事を完成し、昨年11月にNRCに送られた模様である。廃炉については、SHIPPING PORT原子炉が完成に解体されるアメリカではじめての大規模な原子炉と云うことになる。又多分世界でもはじめてのものであろう。これは1984年のはじめに解体が開始され、サイトは元の状態にもどされることになっている。費用は72 millionドルと推定している。この仕事は、今迄の解体に関する経験不足を補うものであり、国際協力を呼びかけている。

スウェーデン：OSKARSHAMN原子炉の近くにある使用済燃料（CLAB）の一時的貯蔵施設の建設は、計画通り進んでいる。この施設は、1985年迄には用意されるだろう。原子炉の廃棄物（SFR）のための最終

的貯蔵所の建設のための許可がおりた。この貯蔵所は、FORSMARK原子炉の近くの海の下岩窟の中に作られることになっており、1988年には完成のはこびである。

イタリー：核燃料サイクルのback-endに特に力を入れている。CANDU型の酸化燃料の再処理はE NEA'S SALUGGIA EUREX PLANTで成行裡に終了した。この実験は約12ヶ月つづいたが、これはE NEAとカナダのAECLとの共同で行われた。高レベル廃棄物を処理し、条件づけるために必要なプロセスを明らかにする仕事が進められ、4つの課題がなされている。これらは満足な結果が与えつつあるが、これは小中規模の再処理プラント（100～200t/Y）にもっとも適しているように思われる。又高レベル廃棄物の処分のためにイタリアの粘土層での研究が進められている。

#### 参考文献

- 1) OECD-NEAの刊行物(1983年)  
THE COSTS OF GENERATING ELECTRICITY IN  
NUCLEAR AND COAL-FIRED POWER STATIONS

