

原子燃料サイクルの総合評価に関する調査

(核燃料サイクル開発機構 契約業務報告書)

1999年3月

高速炉エンジニアリング株式会社

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松 4 番地 4 9

核燃料サイクル開発機構

技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to :

Technical Cooperation Section,

Technology Management Division,

Japan Nuclear Cycle Development Institute

4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1194

Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)

1999

原子燃料サイクルの総合評価に関する調査
(核燃料サイクル開発機構 契約業務報告書)

有江和夫*

要 旨

本調査では、公開文献に基づき種々の燃料サイクルシステムを評価するための指標や手法（評価関数）について、調査、整理、分析を行った。

その結果、現状では、種々の評価指標を統合した総合評価が可能な適切な評価手法は見あたらない。また、今後の新しい原子力システムを総合的に評価していくためには、資源論的側面と環境論的側面の評価が重要であるとともに、安全性、経済性、核不拡散性など数多くの指標を考慮していく必要がある。したがって、総合評価にあたっては、評価者として個々の評価指標として具体的に何を考えるか、を決定することがまず第一に重要であると考えられる。それを明確にした上で、総合評価においては、複数の指標を統合したものとするか、どうか、を含めて、その手法について検討を深めていくことが重要であると思われる。

本報告書は、高速炉エンジニアリング株式会社が核燃料サイクル開発機構との契約により実施した業務成果に関するものである。

契約番号：10C5086

サイクル機構担当部課室：大洗工学センター

システム技術開発部高速炉サイクル解析グループ

※ 高速炉エンジニアリング株式会社 技術部

Study on Comprehensive Evaluation Methods for Nuclear Fuel Cycle

Kazuo Arie *

Abstract

This investigation on comprehensive-evaluation-methods for nuclear fuel cycle has been performed through open-literature search.

As the results, no proper comprehensive-evaluation-method has been found which integrate several factors to be considered into only one factor. In the evaluation of future advanced nuclear energy systems, it is required to evaluate from both view points of natural resources and natural environment, in addition to the other factors such as safety, economy, and proliferation resistance. It is recommended that clarification of specific items or targets to be evaluated is most important as the first thing to be done. Second, methodology for the evaluation should be discussed.

This work was performed by FBR Engineering Co., Ltd. under contract with Japan Nuclear Cycle Development Institute.

JNC Liaison : Fast Reactor Analysis Group, O-arai Engineering Center

* : Engineering Department, FBR Engineering Co., Ltd.

目 次

1. まえがき	1
2. LWR及びFBRサイクルを対象とした評価例の調査	2
2.1 調査方法	2
2.2 調査結果	2
3. 評価手法に関する検討	23
3.1 各評価指標の分析	23
3.2 総合評価手法の分析	29
4. まとめ	33
5. 参考文献	34

表 目 次

表 2.2-1 燃料サイクルを対象とした評価手法の調査結果の整理	4
表 2.2-2 燃料サイクルに対する評価例の調査シート：文献 1	5
表 2.2-3 燃料サイクルに対する評価例の調査シート：文献 2	6
表 2.2-4 燃料サイクルに対する評価例の調査シート：文献 3	7
表 2.2-5 燃料サイクルに対する評価例の調査シート：文献 4	8
表 2.2-6 燃料サイクルに対する評価例の調査シート：文献 5	9
表 2.2-7 燃料サイクルに対する評価例の調査シート：文献 6	10
表 2.2-8 燃料サイクルに対する評価例の調査シート：文献 7	11
表 2.2-9 燃料サイクルに対する評価例の調査シート：文献 8	12
表 2.2-10 燃料サイクルに対する評価例の調査シート：文献 9	13
表 2.2-11 燃料サイクルに対する評価例の調査シート：文献 10	14
表 2.2-12 燃料サイクルに対する評価例の調査シート：文献 11	15
表 2.2-13 燃料サイクルに対する評価例の調査シート：文献 12	16
表 2.2-14 燃料サイクルに対する評価例の調査シート：文献 13	17
表 2.2-15 燃料サイクルに対する評価例の調査シート：文献 14	18
表 2.2-16 燃料サイクルに対する評価例の調査シート：文献 15	19
表 2.2-17 燃料サイクルに対する評価例の調査シート：文献 16	20
表 2.2-18 燃料サイクルに対する評価例の調査シート：文献 17	21
表 2.2-19 燃料サイクルに対する評価例の調査シート：文献 18	22
表 3.1-1 エネルギー資源に関する主な評価指標の整理、分析	25
表 3.1-2 消滅・環境に関する主な評価指標の整理、分析	26
表 3.1-3 核不拡散性に関する主な評価指標の整理、分析	28
表 3.2-1 文献 13 における総合評価関数を用いた各種リサイクルシステムの評価例	32

目 次

図 3.2-1 文献 1 3 における評価関数のベースとなっている考え方	-----	31
--------------------------------------	-------	----

1. まえがき

従来のプルトニウムリサイクルシステムに加え、高速炉サイクルの技術概念を積極的に改善、高度化し、新たな革新技术を取り入れて、高速炉と燃料サイクルの整合性の取れた「先進的核燃料リサイクルシステム」概念として、新型燃料、乾式再処理、小型炉、ゼロリリースシステム等、複数が提案されているが、これらの概念を包括的に比較・検討する方法の一つとして、資源有効利用性、経済性、安全性、環境負荷低減等の複数の観点からの評価を一つにまとめ、総合的な評価を行う考え方が注目されている。

本調査では、このような状況に鑑み、原子燃料サイクルを対象とした総合評価について、国内外の情報を収集し、一般的な総合評価の考え方や具体的な評価手法について調査、整理を行ったものである。

2. LWR及びFBRサイクルを対象とした総合評価例の調査

2.1 調査方法

燃料サイクルを含めた軽水炉や高速炉などの原子燃料サイクル（原子カシステム）を対象とした公開文献における評価例を、評価指標や評価関数等の評価手法の観点から調査、整理した。

調査方法としては、これまで知られている関連の論文とともに、新たにインターネット検索などを用いて関連論文を収集した。インターネット検索においては、下記の検索エンジン及び検索キーワードなどを用いた。

(1) 検索エンジン：NUCLEN world (科学技術振興事業団)

URL：<http://sta-atm.jst.go.jp/jicst/index.html>

検索キーワード：評価関数、燃料サイクル、評価、コストなど

(2) 検索エンジン：AltaVista (米国)

URL：<http://www.altavista.com/>

検索キーワード：+nuclear、 +evaluation、 +”fuel cycle”、
-”nuclear data”、など

2.2 調査結果

調査した各論文における評価指標を整理した結果を表 2.2-1 に示す。また、各論文に記載されている具体的な評価指標及び評価関数について 1 件 1 葉にて整理したものを表 2.2-2～19 に示す。

表 2.2-1 からわかるように、種々の燃料サイクルシステム（あるいは原子カシステム）に対する公開文献に見られる評価は、大別すると、

- (1) エネルギー資源
- (2) 消滅（放射性物質）・環境
- (3) 安全性
- (4) 経済性
- (5) 社会受容性
- (6) 核不拡散性

(7) 開発要素等

の7つの観点（指標）のいずれかにより評価されているといえる。また、評価手法として、複数の指標をひとつのパラメータにまとめる手法（いわゆる総合評価）が用いられているものは、これらの中では文献11と13のみである。

表 2.2-1 燃料サイクルを対象とした評価手法の調査結果の整理

分類	文献 番号	著者または機関	評 価 指 標							備 考
			エネルギー資源	消滅・環境	安全性	経済性	社会受容性	核不拡散性	開発要素他	
評価指標 関連	1	IAEA	○	○	○	○	○	○		1997. IAEA Symp. 要約
	2	IAEA	○	○	○	○				ウラン協会 Symp. (1997)
	3	V.Orlov	○	○	○	○		○		
	4	White Land	○	○	○					
	5	Y.Fujiie	○	○	○		○			SCNES
	6	NAS (米国)						○		「使用済み燃料基準」
	7	IAEA						○		核物質防護区分
	8	N.Rasmussen 他		○		○			○	IAEA Symp. (1997)
	9	W.H.Hannum 他						○		IFR(GLOBAL' 95)
	10	米国OTA		○						環境コスト
評価関数 関連	11	M.Stamatelatos							○	VIA(総合評価手法)
	12	Y.Fujiie 他	○	○	○					SCNES
	13	K.Arie 他	○	○						総合評価
	14	A.N.Chemelev 他							○	余剰中性子の価値
	15	T.Pigford 他		○						総イベントリファクター
	16	C.H.Kang 他		○						処分場イベントリファクター
	17	A.G.Croff 他		○						EPA 相対値
	18	L.Koch 他		○						潜在毒性、他

表 2.2-2 燃料サイクルに対する評価例の調査シート:文献 1

文 献 名	Summary of the IAEA's Symposium "Nuclear Fuel Cycle and Reactor Strategy : Adjusting to New Realities"
著 者・機 関	P. Jelinek-Fink (IAEA)
出 典	IAEA's Symposium "Nuclear Fuel Cycle and Reactor Strategy : Adjusting to New Realities", Vienna, June 1997
評 価 対 象	核燃料サイクル全般
評 価 指 標 及 び 評 価 関 数	(1) 天然資源の活用 (2) 経済性 (3) 環境への影響 (4) 安全性 (5) 社会的受容性 (P A) (6) 各国政策及び国際協力政策 (7) エネルギー供給の持続性
備 考	

表 2.2-3 燃料サイクルに対する評価例の調査シート：文献 2

文 献 名	Nuclear Power and Sustainable Development
著 者・機 関	Jeann-Marie Bourdairre (IAEA) and John Paffenbarger
出 典	Twenty Second Annual International Symposium, London, September 1997.
評 価 対 象	原子力全般
評 価 指 標 及 び 評 価 関 数	<p>1. エネルギー供給の長期持続性 天然ウラン利用率</p> <p>2. 環境適合の長期持続性 大気汚染物質の放出量、 廃熱放出量、 放射性物質放出量、 廃棄物の影響</p> <p>3. 経済性の長期維持 現状のコスト評価、 エネルギーセキュリティに対する正の価値、 二酸化炭素放出に対する負の価値(Carbon Value)、 安全コスト</p>
備 考	

表 2.2-4 燃料サイクルに対する評価例の調査シート：文献 3

文献名	General Requirements for the Next Generation Nuclear Technology on World Wide Scale
著者・機関	V.Orlov (RDIPE, Russia)
出典	First International "White Land" Chapter Conference, Scientific and Technological Basis for Global Energy System, St.Petersburg, February, 1996.
評価対象	原子力エネルギーシステム全般
評価指標 及び 評価関数	<ol style="list-style-type: none"> 1. 燃料生産 <ul style="list-style-type: none"> ・消費量を少なくとも軽水炉の 1 / 10 以下 (増殖比約 1 以上) 2. 安全保障及び核不拡散 <ul style="list-style-type: none"> ・純粋ウランブランケットの不使用 ・転換比約 1 (再処理時の燃料分離抽出の防止) ・再処理時の FP 除染係数約 100 ・MA 混入燃料 ・コロケーション配置 ・核不拡散条約への加盟 3. 放射性廃棄物管理 <ul style="list-style-type: none"> ・自然界放射線レベルの増大防止 ・採掘ウラン鉱廃棄物からの Th 及び Ra 分離 ・MA リサイクル ・Tc 及び I の約 90% 回収とその有効活用 ・FP の約 200 年保管後にそのウラン採掘跡地への同一放射能 FP の埋め戻し ・安定形態 (ガラス、鉱石等) での放射性物質の廃棄 4. 原子力プラントの安全性 <ul style="list-style-type: none"> ・決定論的に周辺住民避難事象を排除 ・余剰反応度 1 \$ 未満 ・Xe、Sm の毒物効果の排除、Pa 効果の排除 ・負の反応度係数 (ボイド、温度等) ・冷却材喪失事故の排除 ・FP 保持性が高く、耐熱・耐放射線性を有する燃料形態 ・小さな冷却材放射化 5. 経済性 <ul style="list-style-type: none"> ・軽水炉並あるいはそれ以下のプラント建設費 ・再処理時分離 FP の限定 (例：I、Tc、Sr、Cs 等) によるコスト低減 ・放射性廃棄物の 200 年保管後の処分による処分の簡素化
備考	

表 2.2-5 燃料サイクルに対する評価例の調査シート：文献 4

文 献 名	Global Energy Program
著 者・機 関	White Land
出 典	http://www.co.ru/~alphabet/wla-e.html
評 価 対 象	エネルギーシステム全般
評 価 指 標 及 び 評 価 関 数	<ol style="list-style-type: none"> 1. 廃棄物も含めたシステム全体の健全性 (Integrity) 2. エネルギー効率 3. 安全性 4. 運用信頼性 5. 必要資源の充足性 6. 最大エネルギー活用のためのリサイクル 7. 廃棄物がないこと 8. 自然界に害を与えないこと
備 考	

表 2.2-6 燃料サイクルに対する評価例の調査シート：文献 5

文 献 名	An Approach to Self-Consistent Nuclear Energy System - Potential of Fast Reactors -
著 者・機 関	Y.Fujii-e
出 典	Int. Conf. Design and Safety of Advanced Nuclear Power Plants (ANP'92), Vol.2, p.11.3-1, Tokyo, Oct. 1992.
評 価 対 象	原子力システム全般
評 価 指 標 及 び 評 価 関 数	<ol style="list-style-type: none"> 1. エネルギー生産 2. 燃料生産（長期にわたるエネルギー資源の確保） 3. 放射性核種の消滅 4. 臨界性に関する安全上の課題の排除
備 考	

表 2.2-7 燃料サイクルに対する評価例の調査シート：文献 6

文 献 名	Managing and Disposition of Excess Weapons Plutonium
著 者・機 関	National Academy of Science (米国)
出 典	Committee on International Security and Arms Control, National Academy Press, 1994.
評 価 対 象	核不拡散性
評 価 指 標 及 び 評 価 関 数	解体Pu処分の目標基準 - 「使用済み燃料基準」 解体核兵器Pu処分の目標基準として、「アクセス困難性（放射線レベル等）、回収困難性（質量、サイズ、大規模化学分離の必要性等）などに関して、商用原子力発電所の使用済み燃料中のPuと同等にする」としたものの。
備 考	

表 2.2-8 燃料サイクルに対する評価例の調査シート：文献 7

文献名	The Physical Protection for Nuclear Material			
著者・機関	IAEA			
出典	INFCIRC/225/Rev.3, 1993			
評価対象	核不拡散性（核物質の防護区分）			
評価指標 及び 評価関数	核物質の区分			
	核物質	形態	区 分	
			I	II
			III	
	プルトニウム	未照射	$\geq 2\text{kg}$	$2\text{kg} > \text{量} > 500\text{g}$
	ウラン-235	未照射		$500\text{g} > \text{量} > 15\text{g}$
		濃縮度 $\geq 20\%$	$\geq 5\text{kg}$	$5\text{kg} > \text{量} > 1\text{kg}$
		$20\% > \text{濃縮度} \geq 10\%$	—	$1\text{kg} \geq \text{量} > 15\text{kg}$
		$10\% > \text{濃縮度}$	—	$10\text{kg} > \text{量} > 1\text{kg}$
	ウラン-233	未照射	$\geq 2\text{kg}$	$2\text{kg} > \text{量} > 500\text{g}$
	照射燃料			$500\text{g} > \text{量} > 15\text{g}$
				劣化ウラン、天然ウラン、トリウム 又は低濃縮燃料
備考				

表 2.2-9 燃料サイクルに対する評価例の調査シート：文献 8

文 献 名	Transmutation of Radioactive Waste: Effect on the Nuclear Fuel Cycle
著 者・機 関	N.C.Rasmussen, T.H.Pigford
出 典	IAEA Int.Symp.on Nuclear Fuel Cycle and Reactor Strategies: Adjusting to New Realities, IAEA-SM-346/41, Vienna, June 1997.
評 価 対 象	TRU/F P 消滅 LWR、米国 A LMR、 TRU/F P 加速器駆動未臨界溶融塩炉
評 価 指 標 及 び 評 価 関 数	(1) 消滅処理による廃棄物処分上のメリット (2) サイクル及び廃棄物中の放射性核種インベントリ低減に必要な時間 (3) 消滅処理システムの複雑さ (4) 開発要素 (5) 経済性
備 考	

表 2.2-10 燃料サイクルに対する評価例の調査シート：文献 9

文 献 名	Self-Protection in Dry Recycle Technologies
著 者・機 関	W.H.Hannum et. al.
出 典	GLOBAL' 95
評 価 対 象	金属燃料サイクルの核不拡散性
評 価 指 標 及 び 評 価 関 数	<p>1. 崩壊熱 使用済み燃料、再処理工程中の物質、回収Pu</p> <p>2. 中性子放出率 使用済み燃料、再処理工程中の物質、回収Pu</p> <p>3. Puの同位体組成－兵器転用の場合の同位体分離の必要性 使用済み燃料、再処理工程中の物質、回収Pu</p>
備 考	

表 2.2-11 燃料サイクルに対する評価例の調査シート：文献 10

文 献 名	Studies of the Environmental Costs of Electricity
著 者・機 関	Office of Technology Assessment (OTA), U.S. Congress
出 典	http://www.emanifesto.org/OTAEnvironmentalCost/index.htm , October 1994.
評 価 対 象	エネルギーシステム全般の環境コスト
評 価 指 標 及 び 評 価 関 数	<p><u>1. Market Valuation</u> 例：水力発電所を建設することによるサケの減少量にサケの市場価格を掛けることにより得られるコスト。 長所：すぐにも適用可能であり、議論の余地が少ない。(客観的) 欠点：環境影響はすべて市場価値に換算できる因子に影響を与えるわけではない。</p> <p><u>2. Hedonic (快樂的な) Valuation</u> 例 1：あるレジャー地の価値は、レジャーを楽しむために自発的にそこへやってくる際にかかる交通費で置き換えることができる。 例 2：人の安全性に係わる価値は、危険地域における作業員の賃金とより安全な地域における作業員の賃金を比較することにより評価できる。 長所：Market Valuationと同様、消費者により導かれるものであり、評価者のひとりよがりには陥りにくい。(客観的) 短所 1：検討目的以外の全ての影響因子について評価する必要がある。 短所 2：人々が考える価値を正確に反映できるとは限らない。</p> <p><u>3. Contingent (起こり得る) Valuation (CV)</u> CVは、各個人の環境破壊に対する価値認識の調査(アンケート)に基づくものである。 長所 1：non-use value (option value, bequest value, existence value)を評価できる唯一の方法。 長所 2：専門家でなくとも価値付けが可能。 短所 1：アンケートの質問の仕方により結果が異なる。 短所 2：時として経済原理とは異なる結果がでる。 短所 3：時として無分別な結果がでる。 短所 4：アンケート回答時にアンケートの使われ方を考えて策略的な回答をする場合がある。 短所 5：以上により信頼性が高い価値評価が難しい。</p> <p><u>4. Control Cost Valuation</u> 例：NOx, SOx, CO2の排出に対して、現行の排出基準を満足させるために必要な費用により評価。 長所：単純である。 短所 1：costs and benefitの評価ができない。(costのみとなる。) 短所 2：評価値のふれ幅が大きい。</p> <p><u>5. Mitigation Cost Valuation</u> Control Cost Valuationでは現行基準ベースに評価されるが、Mitigation Cost Valuationでは推定を含めた将来的な価値評価が行われる。 長所：単純である。 短所 1：costs and benefitの評価ができない。(costのみとなる。) 短所 2：評価値のふれ幅が大きい。</p>
備 考	本文献は発電システムに対する環境コストの種々の評価手法概念を概説し、それらの長短等を評価したものである。

表 2.2-12 燃料サイクルに対する評価例の調査シート：文献 1 1

文 献 名	Application of Value-Impact Methodology in the Design Analysis of a Nuclear Safety System
著 者・機 関	M.G.Stamatelatos et. al. (GA Technologies)
出 典	Nuclear Technology, Vol.64, p.249, Mar. 1984.
評 価 対 象	PWRの補助給水系
評 価 指 標 及 び 評 価 関 数	<p>Value-Impact Methodology(Analysis)</p> <p>(1) 評価指標の値(x_i)が決定論的に定まる場合</p> $u(x_1, x_2, \dots, x_n) = u_1(x_1) + u_2(x_2) + \dots + u_n(x_n)$ <p>x_i : 評価指標 i (attribute)に対する特性値(quantity)</p> <p>$u_i(x_i)$: 評価指標 i に対する特性値 x_i に対する正(value)または負(impact)の価値(utility function)</p> <p>(2) 評価指標の値(x_i)が確率論的な分布を持つ場合</p> $Eu(x_1, x_2, \dots, x_n) = E_1 u_1(x_1) + E_2 u_2(x_2) + \dots + E_n u_n(x_n)$ <p>x_i : 評価指標 i (attribute)に対する特性値(quantity)</p> <p>$u_i(x_i)$: 評価指標 i に対する特性値 x_i に対する正(value)または負(impact)の価値(utility function)</p> <p>E : 期待確率に関する作用子(operator)</p> <p>E_i : 評価指標 i が特性値 x_i を有する期待確率</p>
備 考	Value-Impact Analysis とは、古くからある Cost-Benefit Analysis の概念を金銭以外の評価尺度にも適用するように拡張した概念であり、米国 NRC が 1970 年代頃から使用し始めた用語である。

表 2.2-13 燃料サイクルに対する評価例の調査シート：文献 1 2

文 献 名	An Evaluation Function for a Self-Consistent Nuclear Energy System
著 者・機 関	Y.Fujiie(TIT), M.Suzuki, K.Arie, H.Endo (Toshiba)
出 典	Trans. Am. Nucl. Soc., Vol.69, p.353 (1993)
評 価 対 象	原子力エネルギーシステム全般
評 価 指 標 及 び 評 価 関 数	<p>(1) エネルギー生産 利用可能エネルギー E_p > リサイクルに要するエネルギー E_c</p> <p>(2) 燃料増殖 増殖比 1.0 以上</p> <p>(3) 放射性核種の消滅 $\text{やっかい度} = \sum_i (W_i / ALI_i * f(t_{i,1/2}))$ ここで、 W_i : リサイクル回収漏れ累積及び終局時システムに存在する放射性物質 i の総量 [Bq] ALI_i : 核種 i の年摂取限度 [Bq/年] $f(t_{i,1/2})$: 核種 i の自然崩壊半減期 $t_{i,1/2}$ に依存する重み関数 例 1 : $f(t_{i,1/2}) = t_{i,1/2}$ 例 2 : $f(t_{i,1/2}) = (t_{i,1/2})^2$</p> <p>(4) 安全性 ・負の出力係数 ・自己制御性 ・再臨界の排除 (炉心損傷時)</p>
備 考	

表 2.2-14 燃料サイクルに対する評価例の調査シート：文献 1 3

文 献 名	Long-Lived FP Burning Based on the Actinide Recycle Metal Fuel Core
著 者・機 関	K.Arie et. al. (Toshiba)
出 典	Proc.2nd Int.Symposium on Global Environment & Nuclear Energy Systems-2 (GENES-2), Tsuruga, Oct.-Nov. 1996.
評 価 対 象	原子力システム全般
評 価 指 標 及 び 評 価 関 数	<p>1. SCNES 目標 (エネルギー生産、増殖、消滅) に対する総合達成度 V</p> $V = E / B$ <p>E : 単位天然ウラン量から生産できる電気エネルギー量</p> $E \propto \eta \beta Nu$ <p>η : エネルギー利用率 (発電効率)</p> <p>β : 天然ウラン利用率</p> <p>Nu : システムに使用された天然ウラン量</p> <p>B : 上記エネルギー生産に伴いシステム外に排出された放射性物質のやっかい度の合計</p> <p>2. 核種 i の放射性物質のやっかい度 B_i</p> <p>(1) 定義例 1</p> $B_i(t) = Bq_i(t) / ALI_i$ <p>$Bq_i(t)$: 時刻 t における核種 i の放射エネルギー [Bq]</p> <p>ALI_i : 核種 i の年摂取限度 [Bq]</p> <p>(2) 定義例 2</p> $B_i(t) = W_i(t) * T_{1/2,i}$ <p>$W_i(t)$: 時刻 t における核種 i の原子個数 [個]</p> <p>$T_{1/2,i}$: 核種 i の自然崩壊半減期 [年]</p>
備 考	

表 2.2-15 燃料サイクルに対する評価例の調査シート：文献 1 4

文献名	Contribution of External Neutron Sources in Excess Neutron Generation in SCNES
著者・機関	M. Saito, A. N. Chmelev et. al.(TIT)
出典	Proc.2nd Int. Symposium on Global Environment & Nuclear Energy Systems-2 (GENES-2), Tsuruga, Oct.-Nov. 1996.
評価対象	核分裂炉、加速器駆動原子炉、核融合炉等
評価指標 及び 評価関数	<p>余剰中性子（中性子源）能力</p> <p>(1) 中性子有効利用率UF</p> $UF = \eta_{th} / (1 + \delta)$ <p>η_{th} : 熱-電気エネルギー変換（発電）効率</p> <p>δ : System Configuration</p> $\delta = (e_f N_{f, NS} + e_j N_{NS}) / e_f N_{f, net}$ <p>e : 核反応当たりの発生エネルギー</p> <p>N : 核反応率</p> <p>添字_f : 核分裂反応、 添字_j : 核分裂反応以外</p> <p>添字_{NS} : 中性子源</p> <p>(2) 余剰中性子コストENC (Excess Neutron Cost)</p> $ENC = (e_j + e_f N_{f, NS} / N_{NS}) / (S_{NS} - n_{br, NS} - n_{c, NS} - n_{l, NS} - n_{tr, NS} N_{f, NS} / N_{NS})$ <p>S : 中性子源の中性子発生率</p> <p>n : 中性子数</p> <p>添字_{br} : 増殖、 添字_c : 寄生捕獲、 添字_l : 漏洩</p> <p>添字_{tr} : 核分裂連鎖反応</p>
備考	

表 2.2-16 燃料サイクルに対する評価例の調査シート：文献 15

文献名	Inventory Reduction Factors for Actinide-Burning Liquid-Metal Reactors
著者・機関	T.H.Pigford (UC Berkeley), J.S.Choi (LLNL)
出典	Trans. Am. Nucl. Soc., Vol.64, p.123 (1991)
評価対象	ワンスルー軽水炉及びアクチニドリサイクルALMR
評価指標 及び 評価関数	(1) TRUインベントリ減少ファクター $\Psi(t)$ $\Psi(t) = \frac{\text{(アクチド燃焼をしない場合の軽水炉使用済み燃料に含まれる時刻 } t \text{ における TRUインベントリ)}}{\text{(アクチド燃焼炉 ALMR とその燃料サイクル及び軽水炉燃料・ALMR 燃料再処理にて生ずる高レベル廃棄物に含まれる時刻 } t \text{ における TRUインベントリ)}}$
備考	

表 2.2-17 燃料サイクルに対する評価例の調査シート：文献 16

文 献 名	Transuranic Inventory Reduction in Repository by Partitioning and Transmutation
著 者・機 関	C.H.Kang et. Al. (MIT)
出 典	Trans. Am. Nucl. Soc., Vol.66, p.79 (1992)
評 価 対 象	ワンスルー軽水炉、P uリサイクル軽水炉、自給自足LMR、及びTRU燃焼LMR
評 価 指 標 及 び 評 価 関 数	(1) 処分場におけるTRUインベントリ減少ファクター $\Phi(t)$ $\Phi(t) = (\text{ワンスルー軽水炉システムの処分場の時刻 } t \text{ における TRUインベントリ}) / (\text{着目消滅炉から生ずる処分場の時刻 } t \text{ における TRUインベントリ})$
備 考	

表 2.2-18 燃料サイクルに対する評価例の調査シート：文献 17

文 献 名	A Reexamination of the Incentives for Actinide Burning
著 者・機 関	A.G.Croff et. al.
出 典	Proc.LMR: A Decade of LMR Progress and Promise, Washington D.C., Nov. 1990. ANS
評 価 対 象	アクチニドリサイクルシステム
評 価 指 標 及 び 評 価 関 数	1. アクチニドリサイクルの効果 米国EPA基準に対する相対値による処分場における放射性核種の インベントリの時間変化
備 考	

表 2.2-19 燃料サイクルに対する評価例の調査シート：文献 18

文 献 名	Formation and Recycling of Minor Actinides in Nuclear Power Stations
著 者・機 関	L.Koch
出 典	Handbook on the Physics and Chemistry of the Actinides, Elsevier Science Publishers B.V., 1986.
評 価 対 象	消滅処理の効果
評 価 指 標 及 び 評 価 関 数	<p>1. 天然ウラン鉱石の cancer risk に対する廃棄物に含まれる放射性核種の cancer risk の比（いわゆるポテンシャルハザード指数）の時間変化</p> <p>2. 地中処分上から経口摂取に至るまでの放射性核種の移行率（移動速度）を考慮した場合の廃棄放射性核種による被曝線量率 [rem/yr] (Bertozzi 他、1982.)</p>
備 考	

3. 評価手法に関する検討

3.1 各評価指標の分析

本節では、前記調査結果を踏まえ、主な評価指標について、分析、評価を行う。

(1) エネルギー資源

エネルギー資源に関わる主な評価指標について分析、評価した結果を表 3.1-1 に示す。エネルギー資源に関する評価指標は、従来の増殖炉の評価として比較的よく用いられているものばかりであり、評価の目的に応じて使い分けられよとえられる。

(2) 消滅・環境

消滅・環境に関わる主な評価指標について分析、評価した結果を表 3.1-2 に示す。

放射性核種の消滅に関しては、数多くの評価が国内外にて行われており、指標としてもバリエーションに富んでいる。各評価指標の用いられ方は、各論文の著者の考えが定量的に表現できるように使用されているとの印象が多い。例えば、消滅処理に否定的な意見の著者はそのような結果となる指標を採用している場合があるものと推測され、また、その逆の傾向も考えられる。現状では、消滅に関する指標として統一されたものはないため、やむを得ないと言える。このような状況下において、消滅の評価を極力客観的に行うためには、種々の手法を勘案して評価をおこなっていくことが重要であろう。

また、近年では地球温暖化問題などの観点から地球環境保護の観点からエネルギーシステムを評価する例が増えてきている。CO₂排出問題などは化石燃料と対比して原子力エネルギー全般の優位性を示す因子となっているが、原子力エネルギーの中での差異についてはほとんどないものとして特に議論されることはない。しかし、地球温暖化問題などにおいて”環境コスト”との観点から環境問題をコストで評価するという動きがあるため、例えば原子力システムの放射性廃棄物の課題についても環境コストの観点から今後評価することが重要となってくる可能性が高いと推測される。ただし、米国OTAの文献10からもわかるように、環境コストの評価は現状では手法上の種々の課題を有しており、各手法の長短を十分に認識した上で用いることが重要であると考えられる。

(3) 核不拡散性

核不拡散性に関わる主な評価指標について分析、評価した結果を表 3.1-3 に示す。

核不拡散性に関しては、同表に示したような技術論だけで評価できるものではなく、保障措置などと組み合わせた政治的課題である、との考え方がある点に注意しておく必要がある。そのような認識の下、技術的には同表に示した種々の指標が考えられている中で、米国 N A S の使用済み燃料基準が比較的広く認められているであろうと思われる。ただし、わが国において、P u リサイクルシステムを実現していくためには、現実的には核不拡散性の高い燃料サイクルは極めて重要であると考えられ、諸外国の理解を得るためには、核不拡散に関する評価指標は、その他の項目よりも重みをつけて考えることも考慮する必要があるかもしれない。

(4) その他

安全性、経済性、社会受容性、開発要素などに関わる評価指標については、種々のものが考えられるが、表 3.2-1～3 に示すような形で整理、分析することは困難であり、個々に評価、分析、判断していくのが現状では一般的と考えられる。しかし、これらはいずれも重要な因子であり、今後、統一的な評価指標を検討していくことも必要であろう。

表 3.1-1 エネルギー資源に関する主な評価指標の整理、分析

番号	評価指標	指標の単位例	評価対象	評価指標に対する分析、評価、コメント等	備考
1	天然ウラン累積消費量	tU	高速炉、軽水炉等	エネルギー資源の観点から最も直接的な指標である。	
2	エネルギー供給の持続性	年	全ての発電システム	石炭、石油、ウラン等天然資源枯渇までの年数。	
3	天然ウラン利用率	%	高速炉、軽水炉等	増殖比1以上の場合に、増殖速度の差が考慮できない。	
4	増殖比(転換比)	無次元	高速炉、軽水炉等	原子炉インベントリの差が考慮できない。	
5	原子炉倍増時間	年	高速炉	炉外インベントリ効果が考慮できない。	
6	システム倍増時間	年	燃料サイクルを含む 高速炉システム全体		
7	複合システム倍増時間	年	燃料サイクルを含む 高速炉システム全体	燃料増殖に関しては、多数基の炉を有する燃料サイクルシステム全体の特性を表すという点において、その他の倍増時間より現実的。	
8	エネルギー変換効率 (発電効率)	%	全ての発電システム (火力、原子力、太陽エネルギー等の比較)		

表 3.1-2 消滅・環境に関する主な評価指標の整理、分析 (1/2)

番号	評価指標	指標の単位例	評価対象	評価指標に対する分析、評価、コメント等	備考
1	廃棄物中の潜在毒性、放射能量等	各放射性核種の年摂取限度(Bq/年)に対する相対値(無次元)、 Bq、等	燃料サイクルを含む原子力システム全般	消滅処理の効果を表す指標として比較的よく用いられている。 各核種の負の価値として、年摂取限度(ALI)が用いられるのが一般的であるが、その他の例として、長半減期放射性物質の心理的な不安要素を加味する観点から半減期の2乗の重みをつける指標の例がある。	文献12、13、17、18
2	天然ウラン鉱石1tHMがもつ潜在毒性等に対する使用済み燃料1tHMから発生する廃棄物中の潜在毒性の比	無次元	燃料サイクルを含む原子力システム全般	同上。	文献3、18
3	地中処分後の各核種毎の移行率の差異を考慮した廃棄物危険度(線量率等)	rem/年	燃料サイクルを含む原子力システム全般	地中処分の安全評価相当の指標を簡易に算出するものと考えられる。MAに比べて長半減期FPの消滅の方が意義が大きいことを示す場合に使用されることが多い。	文献18
4	燃料サイクル内及び廃棄物内の放射性物質の総インベントリ	t	燃料サイクルを含む原子力システム全般	軽水炉ワンスルーと消滅処理システムを比較した場合、この指標では消滅効果が出にくい。	文献8、15
5	廃棄物内の放射性物質の総インベントリ	t	燃料サイクルを含む原子力システム全般	上記に比べ、消滅効果が出やすい。	文献16
6	消滅処理による廃棄物処分場に対する具体的メリット	-	燃料サイクルを含む原子力システム全般	廃棄物発熱量の低減、重要放射性核種の削減、廃棄物放射能濃度の低減などによる処分場の合理化等が表現できる。 ただし、現状では明確にメリットが示すことができるケースは少ない。	

表 3.1-2 消滅・環境に関する主な評価指標の整理、分析 (2/2)

番号	評価指標	指標の単位例	評価対象	評価指標に対する分析、評価、コメント等	備考
7	放射性核種の消滅速度	%/年、kg/年	消滅処理炉全般		
8	CO ₂ 、NO _x 、SO _x 等の排出量	kg/年/GWe 等	全ての発電システム (主として、火力と原子力の比較)	化石燃料エネルギーに対する原子力エネルギーの優位性を示す場合に用いられることが多い。	
9	環境コスト	¥、\$ 等	全ての発電システム	種々のものが考えられるが、評価手法そのものが研究段階と考えられる。将来的には重要となる可能性が大きいと思われる。	文献10

表 3.1-3 核不拡散性に関する主な評価指標の整理、分析

番号	評価指標	指標の単位例	評価対象	評価指標に対する分析、評価、コメント等	備考
1	現行軽水炉の使用済燃料相当	—	燃料サイクル各工程における核燃料物質	米国NAS/DOEが提案している解体Pu処分の目標基準	文献6
2	IAEA核物質防護基準	—	同上	IAEAの基準	文献7
3	取扱核物質の崩壊熱、放射線量率、サイズ、重量等	W/kg、R/hr、t等	同上	取扱の困難性	文献9
4	取扱核物質の中性子放出率	個/kg	同上	核兵器としての性能低下	文献9
5	取扱核物質のPu同位体組成	—	同上	兵器転用時の同位体分離の必要性	文献9
6	低除染燃料	FPの除染係数、R/hr等	再処理からの製品	取扱の困難性	文献3、他
7	コロケーション配置	—	原子炉及びサイクル施設配置	核物質輸送工程の削減	文献3
8	炉心とブランケットの混合再処理、転換、抽出、等	—	再処理システム	Pu単独抽出の防止	文献3
9	純粋ウランブランケットの不使用	—	高速炉ブランケット燃料	高純度Pu生成の防止	文献3
10	転換比1の炉心	無次元	高速炉炉心	再処理時Pu/U分離の防止	文献3
11	MA混入燃料	—	高速炉燃料	中性子放出率増大	文献3

3.2 総合評価手法の分析

複数の指標をひとつの指標に集約して総合評価する手法としては、今回の調査からは、文献11及び13のみであった。

文献11は、いわゆるVIA (Value Impact Analysis) とよばれる手法であり、原子力分野では1980年代前後に安全設計に関連して適用された例が比較的多いようである。この手法は、考慮する種々の評価因子について重み関数を評価者が設定する必要があるため、この重み関数が客観的に明らかである場合でなければ、評価結果の信頼性が低いという致命的とも言える短所を有している。しかし、設計仕様が明確になっており、個々の仕様の変更による影響(効果)も明確であるような評価対象の場合において、かつ評価において考慮する因子の数が多い場合には、有効な手法となる可能性がある。このようなVIA手法は、最近では適用された例はあまりないようである。

文献13は、図3.2-1に示すように原子炉を含めた燃料サイクルシステム全体をマクロに見た場合に、inputとなる天然ウランから、outputとして電力と放射性廃棄物が出てくるとの観点に立って、risk-benefit論的にシステム全体を評価する手法を用いている。すなわち、ある一定の天然ウランからbenefitとしてどれだけの電力を生産可能であるか、また、riskとしてどれだけの放射性廃棄物が後に残るか、という比較的単純で分かりやすいものとなっており、評価目的によっては有用であると考えられる。ワンスルー軽水炉、通常の高速炉及びアクチニドリサイクル・長寿命FP消滅高速炉の各燃料サイクルシステムを対象として評価した結果の例を表3.2-1に示す。この例からわかるように、同手法を用いることにより、下記の点について各システムの特徴を定量的によく表すことが出来ている。

- ・軽水炉と高速炉の比較において、増殖特性及び発電効率(エネルギー利用効率)の差から得られる電力量は高速炉のほうが約270倍となる。
- ・軽水炉、高速炉ともに、残留する放射性物質のやっかい度は、FPに支配されるため、両者の放射性物質のやっかい度は発生電力量にほぼ比例するが、それでもやっかい度に対する発生電力量の比V(価値)は、高速炉のほうが2割ほど上回る。
- ・更に高速炉をベースに、PuのみならずMAも一括してリサイクルするアクチニドリサイクルシステムとし、かつ、主要な長半減期FPの消滅処理を行うシステムを対象に評価すると、上記の高速炉に加え、残留するFPのやっかい度が大幅に低減されるため、同評価関数における価値Vの値は大幅に向上する。また、FPリサイ

クル時の回収率向上による価値 V への効果も定量的に表現することができる。

尚、この例における放射性物質のやっかい度は、単に残留する放射性物質の原子数に半減期を掛けたものを用いているが、評価目的によってこのやっかい度の定義を変えて評価することも可能である。

ただし、この手法では、倍增時間のような燃料増殖の速度に関しては考慮できていないという短所を有する。また、安全性や経済性などその他の考慮すべき因子について考慮していないため、改善の余地がある。

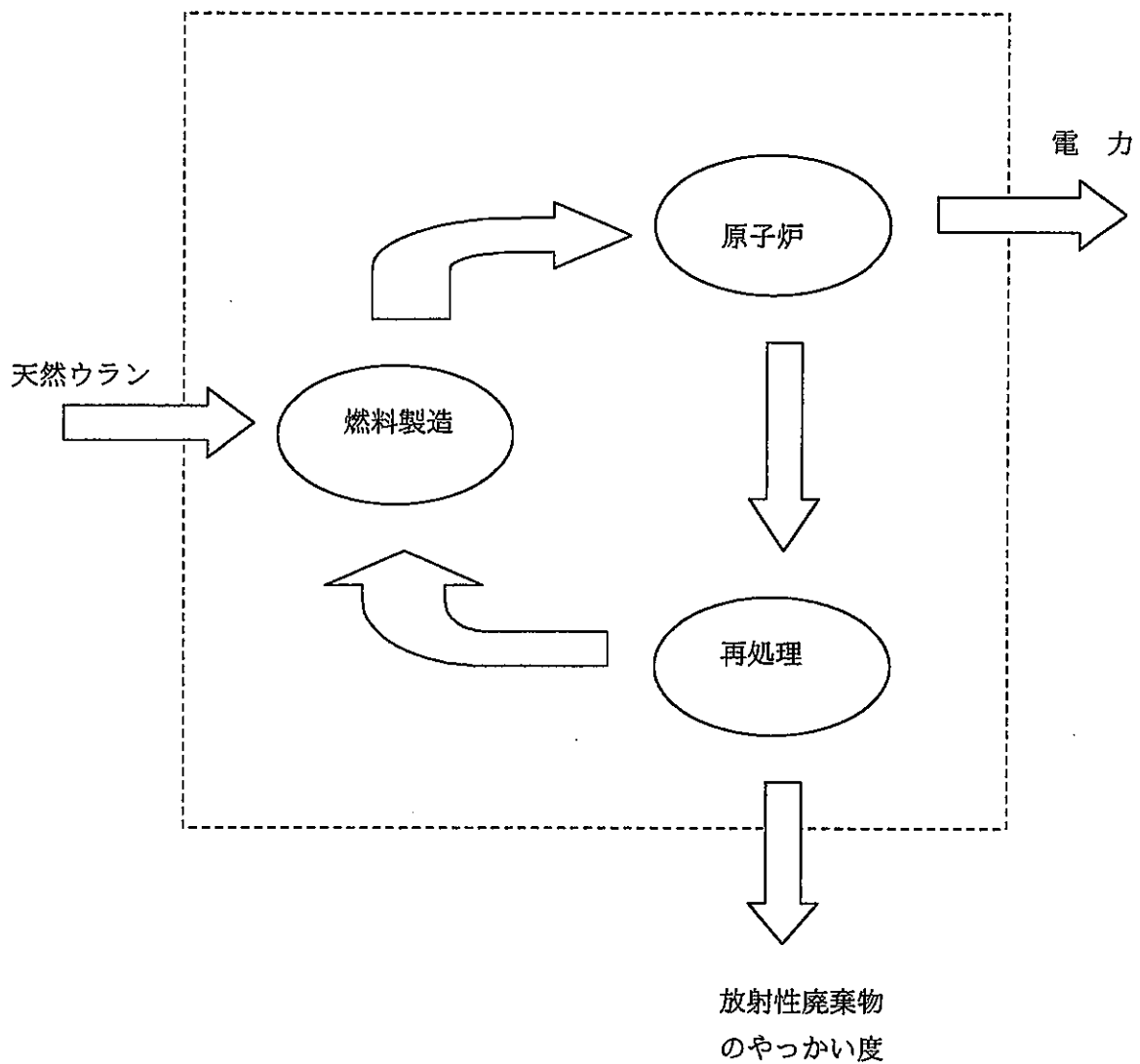


図 3.2-1 文献 1 3 における評価関数のベースとなっている考え方

表3.2-1 文献13における総合評価関数を用いた各種リサイクルシステムの評価例（単位天然ウラン投入時の比較）

項 目	軽 水 炉 (ワンスルー)	通常のFBR (Puリサイクル)	論文13におけるFBR (アクチニドリサイクル・FP消滅システム)	
			(ケース1)	(ケース2)
エネルギー利用効率 (%)	34	40	40	←
増殖比	0.4	1.0	1.0	←
燃焼度 (%)	3	10	10	←
燃料回収ロス率 (%)	—	0.2	0.1	←
天然ウラン利用率 (%)	0.43	98	99	←
発生電力量E (相対値) *1	1.0	268	271	←
FP回収ロス率 (%)				
I、Tc、Pd、Sn	—	—	10	0.1
Se	—	—	1	0.1
Zr、Cs、Sr	—	—	20	0.1
廃出放射性物質のやっかい度B (相対値) *1 *2				
燃料核種のやっかい度	0.060	6.5	0.02	0.02
FP核種のやっかい度	0.940	216	29.8	0.22
全やっかい度B	1.0	223	29.8	0.24
目標達成度 $V = E/B$ (相対値) *1	1.0	1.2	9.1	1130

*1、軽水炉を1.0として規格化。

*2、やっかい度の定義は、(原子個数*半減期)に基づく。

4. まとめ

本検討では、公開文献に基づき種々の燃料サイクルシステムを評価するための指標や手法（評価関数）について、調査、整理、分析を行った。

その結果、現状では、種々の評価指標を統合した総合評価が可能な適切な評価手法は見あたらない。また、今後の新しい原子力システムを総合的に評価していくためには、資源論的側面と環境論的側面の評価が重要であるとともに、安全性、経済性、核不拡散性など数多くの指標を考慮していく必要がある。したがって、総合評価にあたっては、評価者として個々の評価指標として具体的に何を考えるか、を決定することがまず第一に重要であると考えられる。それを明確にして上で、総合評価においては、複数の指標を統合したものとするか、どうか、を含めて、その手法について検討を深めていくことが重要であると思われる。

5. 参考文献

- (1) P. Jelinek-Fink, *Summary of the IAEA's Symposium "Nuclear Fuel Cycle and Reactor Strategy : Adjusting to New Realities"*, Vienna, June 1997.
- (2) Jeann-Marie Bourdairre and John Paffenbarger, *Nuclear Power and Sustainable Development*, Twenty Second Annual International Symposium, London, September 1997.
- (3) V. Orlov, *General Requirements for the Next Generation Nuclear Technology on World Wide Scale*, First International "White Land" Chapter Conference, Scientific and Technological Basis for Global Energy System, St. Petersburg, February, 1996.
- (4) White Land, *Global Energy Program*, <http://www.co.ru/~alphabet/wla-e.html>
- (5) Y. Fujii-e, *An Approach to Self-Consistent Nuclear Energy System - Potential of Fast Reactors -*, Int. Conf. Design and Safety of Advanced Nuclear Power Plants (ANP' 92), Vol.2, p.11.3-1, Tokyo, Oct. 1992.
- (6) National Academy of Science (米国) , *Managing and Disposition of Excess Weapons Plutonium*, Committee on International Security and Arms Control, National Academy Press, 1994.
- (7) IAEA, *The Physical Protection for Nuclear Material*, INFCIRC/225/Rev.3, 1993.
- (8) N. C. Rasmussen, T. H. Pigford, *Transmutation of Radioactive Waste: Effect on the Nuclear Fuel Cycle*, IAEA Int. Symp. on Nuclear Fuel Cycle and Reactor Strategies: Adjusting to New Realities, IAEA-SM-346/41, Vienna, June 1997.
- (9) W. H. Hannum et. al., *Self-Protection in Dry Recycle Technologies*, GLOBAL' 95
- (10) Office of Technology Assessment, U.S. Congress, *Studies of the Environmental Costs of Electricity*, <http://www.emanifesto.org/OTAEnvironmentalCost/index.htm>, October 1994.
- (11) M. G. Stamatelatos et. al., *Application of Value-Impact Methodology in the Design Analysis of a Nuclear Safety System*, Nuclear Technology, Vol.64, p.249, Mar. 1984.
- (12) Y. Fujiie, M. Suzuki, K. Arie, H. Endo, *An Evaluation Function for a Self-Consistent Nuclear Energy System*, Trans. Am. Nucl. Soc., Vol.69, p.353 (1993)
- (13) K. Arie et. al., *Long-Lived FP Burning Based on the Actinide Recycle Metal Fuel Core*, Proc.2nd Int. Symposium on Global Environment & Nuclear Energy Systems-2 (GENES-2), Tsuruga, Oct.-Nov. 1996.

- (14) M. Saito, A. N. Chmelev et. al., *Contribution of External Neutron Sources in Excess Neutron Generation in SCNES*, Proc.2nd Int. Symposium on Global Environment & Nuclear Energy Systems-2 (GENES-2), Tsuruga, Oct.-Nov. 1996.
- (15) T. H. Pigford, J. S. Choi, *Inventory Reduction Factors for Actinide-Burning Liquid-Metal Reactors*, Trans. Am. Nucl. Soc., Vol.64, p.123 (1991)
- (16) C. H. Kang et. Al., *Transuranic Inventory Reduction in Repository by Partitioning and Transmutation*, Trans. Am. Nucl. Soc., Vol.66, p.79 (1992)
- (17) A. G. Croff et. al., *A Reexamination of the Incentives for Actinide Burning*, Proc. LMR: A Decade of LMR Progress and Promise, Washington D.C., Nov. 1990. ANS
- (18) L. Koch, *Formation and Recycling of Minor Actinides in Nuclear Power Stations*, Handbook on the Physics and Chemistry of the Actinides, Elsevier Science Publishers B.V., 1986.