B206 原子力発電所の廃止措置・長寿命化の計画決定手法に関する研究

A Study on Decision-Making Methodology for Decommissioning/Life Extension of Nuclear Power Plant

○柳原敏（原研）、高尾武（電中研）、助川武則（原研）

Satoshi YANAGIHARA, JAERI, 2-4 Shirakata-shirane, Tokai-mura, Ibaraki-ken

Takeshi TAKAO, CRIEPI, 2-11-1, Iwado-kita, Komae-shi, Tokyo

Takenori SUKEGAWA, JAERI, 2-4 Shirakata-shirane, Tokai-mura, Ibaraki-ken

This paper deals with decision-making methodology for decommissioning/life extension of nuclear power plant in the total plant life management (PLM). Two computer systems for economical evaluation of PLM and for planning and management of reactor decommissioning have been developed so far by the Central Research Institute of Electric Power Industry and the Japan Atomic Energy Research Institute, respectively, and the related studies on plant life extension and decommission are on going in both organizations independently. The two computer systems were then effectively combined to evaluate the PLM data elements such as power generation costs, worker dose, waste arisings for decision-making on plant life scenarios of decommission/life extension. The preliminary study on PLM indicated that the 20 years life extension would effective for lowering levelized power generation costs in whole life, and that decommissioning costs were affected by the life extension procedures if the disposal costs of replaced components were included in it. The optimum plant life scenario will be decided based on the evaluation of PLM data including other elements such as social effects. The computer systems will be customized for future study on plant life optimization.

Key Words : Decommissioning, Plant Life Management, Life Extension, Decision-making, Nuclear Power Plant, Worker Dose, Power Generation Cost, Radioactive Waste, Project Management Data

1. はじめに

我が国では平成12年8月現在52基の原子力発電所が運転されているが、その中でも初期に建設されたものは30年を超えて運転が続けられている。原子力発電所のより経済的なライフサイクルを実現するためには適切な施設・機器の経年劣化対策を施すことによって長期継続運転（簡単のため長寿命化と呼ぶ）することが必要である。一方、経済的な理由で運転を中止することになった原子力発電所や、長寿命化がなされた原子力発電所でも、最終的にはその運転を終了する時期を迎えることになるため、適切な廃止措置が必要となる。

このような状況を背景に、電力中央研究所（電中研）では原子力発電所の建設、運転、長寿命化対策等の総合的評価のための計算システムを開発するとともに、プラントライフマネジメント（PLM）の経済性に関する評価を進めている^{1)~3)}。他方、日本原子力研究所（原研）では、JPDR（Japan Power Demonstration Reactor）の廃止措置を実施するとともに、それらの作業から各種作業データを収集し、その分析に基づいて廃止措置計画の策定及び管理のための計算システムを開発している^{4),5)}。

長寿命化と廃止措置は我が国の原子力発電所の現在から将来にわたっての重要課題であるが、施設を効率的に運転して行くための総合的な設備管理である PLM を適

切に行うためには、これらを個々の問題として扱うのではなく、建設、運転、長寿命化、廃止措置に至るライフサイクルの中で評価することが必要となる。

そこで、電中研及び原研が各々独立して研究を実施してきた長寿命化対策と廃止措置に関する問題を PLM の中で関連する問題として検討することとし、原子力発電所の廃止措置・長寿命化の計画決定手法に関する研究を共同で開始した。本研究では、PLM の中で廃止措置と長寿命化計画に関する意志決定の方法論に関する検討、長寿命化対策が廃止措置に及ぼす影響の評価を進めた。また、双方が独自に開発した計算システムを連結して PLM のシナリオ設定や PLM 検討項目（費用、被ばく線量等、以下 PLM データと呼ぶ）の評価が可能となるよう統合化を計るとともに、それをういた廃止措置と長寿命化が発電単価に及ぼす影響等の予備解析を行った。

本報告は、電中研と原研が共同で実施した原子力発電所の廃止措置・長寿命化に関する意志決定の方法論の検討についてまとめたものである。

2. 長寿命化と廃止措置に関する研究

2.1 長寿命化に関する研究

原子力発電所は今後長期にわたり我が国の電力供給の主要施設であり得ると考えられることから、長期的な視

点で施設の全運転期間中の効率的な運転保守を行うための総合的な PLM を検討しておくことは、今後の原子力開発利用戦略上きわめて重要な課題である。PLM においては、原子炉压力容器、炉内構造物、蒸気発生器等の重要機器・構造物の寿命評価結果に基づき、機器の補修・取替や使用環境の改善施策を定める長期保全計画の策定が行われる。この保全計画策定には、施策の実施時期と費用の関係等を明らかにするなど経済性への配慮が重要である。さらに、施設の運転が長期化するに伴って、運転を継続した場合と廃止措置した場合の経済性の比較、施設の最終停止工程やその内容の決定等、総合的な判断に基づいて原子力発電所を廃止措置する問題がいずれ現実化するものと思われる。

このような背景のもとで開発された PLM に係わる種々の意志決定を支援するための総合支援システム (INPLEX) は原子力発電所の長期保全計画の策定に必要な機器の設定、機器の寿命評価、各種経済性評価等を行う長期保全計画の作成支援に必要な総合的計算プログラムである。このうち経済性評価システムは後述するように、資本費、運転費、燃料費、廃止措置費、長寿命化対策費等とその運転シナリオに基づいて発電単価を計算するプログラムであり、PLM の総合評価の主要な部分を構成している。

2.2 廃止措置に係わる研究

運転を終了した原子力発電所を安全で合理的に廃止措置するためにはそのシナリオを十分に検討することが重要であるが、そのためには設定したシナリオに基づいて費用、被ばく線量、廃棄物発生量等のプロジェクト管理データを算出し、その特徴を明らかにすることが必要である。原子炉施設の廃止措置計画の策定及び管理のための計算システム (COSMARD) は廃止措置シナリオを作成すると共に、それに必要な炉心部の放射能インベントリ、作業領域での線量当量率、プロジェクト管理データ (費用、人工数、被ばく線量、廃棄物量) の計算を行うことができる計算プログラムである。このうち管理データ計算サブシステム (Dmaf) は、原子炉の廃止措置に必要な作業を合理的と考えられる程度で分割可能な最小作業単位 (単位アクティビティ) に細分化し、この単位アクティビティ毎にプロジェクト管理データを算出すると共に、それを作業構成に沿って積算する。計算結果としては、作業構成に従って作業毎にプロジェクト管理データ、廃止措置全体の工程計算結果が出力される。

一方、JPDR の解体作業においては、廃止措置に必要な各種作業データの収集・分析を進めた。例えば、基本的な作業に対して、解体対象の機器毎あるいは解体装置毎に、解体対象の機器重量と所要人工数、切断長と所要人工数の関係を明らかにし、人工数や費用を算出するための計算モデルを開発した。また、廃止措置に必要な費用項目に対して、廃止措置プロジェクト特有の条件を考慮して、その費用を算出して分類できるようデータベースの整備を進めてきた。

2.3 廃止措置・長寿命化計画の決定評価方法

原子力発電所の長期継続運転に伴う PLM を統合的に評価するため、廃止措置及び長寿命化に関するシナリオを明確にする必要がある。例えば、廃止措置シナリオについてみると、施設の解体作業の内容、運転停止から解体作業までの期間 (密閉管理)、廃棄物の処理処分方法

Fig.1 Concept of decision process for decommissioning and life extension scenarios

等がある。また、長寿命化対策に関しては、その対象となる施設・機器の選定、交換した機器の処分方法、長寿命化期間等が考えられる。これらのシナリオに基づいて PLM の詳細が設定されることになるが、その選択肢は複数あり得るため、各シナリオに対する PLM データの検討項目を決めて、それらを定量化することが必要となる。PLM データとしては、経済性の評価のための費用と利益が主要な項目であるが、作業者の被ばく線量、廃棄物発生量等も考慮する必要がある。そこで、これらの PLM 検討項目の値を計算により求めること、また、それを用いた PLM 決定手法に関する検討を進めた。Fig.1 に PLM を評価するための基本的考え方を示す。

3. プラントライフマネジメント

3.1 基本的考え方

建設、運転、長寿命化、廃止措置におけるライフサイクルについての総合的な評価の中で、長寿命化と廃止措置が相互に影響を及ぼす場合の検討は十分ではない。そこで主に長寿命化対策が施された場合、廃止措置のプロジェクト管理データや発電単価に及ぼす影響について検討を進めた。PLM データは、プラントライフシナリオを設定することにより定量的に評価できるものであるが、例えば、地域社会への影響 (雇用、地域経済等) 等に関しても考慮する必要がある。以下に PLM 検討項目について記す。

経済性

原子力発電所の PLM における経済性の評価は発電費用が基本になる。長寿命化、廃止措置 (廃棄物処分を含む) に関する全ての費用は発電単価に帰着させることが出来る。他方、施設の運転によって得られる利益も経済性を評価する上で重要な因子である。すなわち、費用 (発電単価) と利益により経済性に関する評価が行われる。

被ばく線量

長期保全計画や廃止措置における作業者の被ばく対策は費用に帰着することができるものの、被ばく対策の妥当性については独自に評価する必要がある。また、作業者の被ばく線量は PLM における各種選択肢を決定する上で重要な要素になり得る。

廃棄物

放射性廃棄物の発生量は、廃棄物処分費用として経済性に影響を及ぼす大きな要素である。しかし、社会的な影響の観点からは、経済性とは独立して廃棄物発生量の変化を考慮する必要がある。

なお、原子力発電所の建設から廃止措置に至るまでのプラントライフは常に時間経過との関係で評価されるべきものであるため、基本的なプラントライフに関する工程を設定し、その範囲内で長寿命化・廃止措置に関するシナリオを変更することとした。Fig.2 は PLM データを評価するための基本シナリオに関する概念図である。原子力発電所の運転期間は 40 年とし、長寿命化（20 年）と廃止措置（10～20 年）を考慮することとした。

3.2 経済性評価手法

経済性の評価では、費用と利益の計算が基本となる。費用評価手法は、基本的には毎年の必要収入を計算して、それを総括原価とする方法を利用するのが一般的である。必要収入は、資本費、運転費、燃料費およびその他の費用で構成される。資本費は、利子、減価償却費及び固定資産税からなり、運転費は、通常運転時の運転費、修繕費及び人件費からなる。また、燃料費は精鉱費、転換費、濃縮費、組立費及び運送費からなり、その他の費用は、廃止措置費、燃料再処理費等からなる。評価に必要な費目は、資本費等の大区分では規模が同じであれば原子力発電所毎にはあまり変わらないが、保守に関連する詳細な構成費目においては施設によって多少の差異が生じることが予想される。しかし、発電単価等の計算結果には殆ど影響しないと考えられる。

一方、利益についても、発電費用、電力販売価格、電力外部手当費用、設備利用率等を利用して、容易に算出できるが、将来の電力需要や大型改修費等の発生状況、電力販売単価等に大きく左右されることが考えられる。

発電単価については、5 年程度の期間であれば貨幣価値の変化を考慮する必要はないが、運転開始年の異なっ

Table 1 Decommissioning cost groups

1.	Pre-decommissioning actions
2.	Facility shutdown activities
3.	Procurement of general equipment and material
4.	Dismantling activities
5.	Waste treatment and disposal
6.	Security, surveillance and maintenance
7.	Site cleanup and landscaping
8.	Project management engineering and site support
9.	Research and development
10.	Fuel
11.	Other costs

た原子力発電所間の比較や 10 年以上にも亘る評価を行う場合には、物価上昇率、割引率等を勘案しながら基準年換算を行う方が現実に近い結果が得られる。

3.3 長寿命化対策と廃止措置の費用評価

経済性の評価においては、長寿命化対策及び廃止措置に関する必要な作業と対応した上で、費用項目を体系的に評価しておく必要がある。これらの費用項目に関しては、OECD/NEA や IAEA 等でも検討が行われているため⁶⁾、それらを参考にして出来るだけ詳細に項目の抽出とそのデータの設定を行うこととした。廃止措置に関する主要な費用項目の分類を Table 1 に、また、長寿命化対策に伴って追加されると考えられる主要な費用項目を Table 2 に示す。廃止措置に関しては、各項目毎に 10 以上の細分化費用項目が存在する。例えば、解体作業では炉内構造物の解体、原子炉圧力容器の解体、蒸気発生器の解体等、主要な機器毎の解体作業に要する費用がその項目として抽出されている。

4. 長寿命化・廃止措置の計画決定手法

4.1 PLM データの計算

長寿命化対策や廃止措置を PLM の中でどのように位

Fig.2 Basic scenario of plant life management

Table 2 Cost drivers of plant life extension

1. Safety upgrades to meet regulatory requirements
2. Other significant industry related events
3. Wastes of spent fuel management
4. Decommissioning related
5. Other non-safety and conventional system upgrades
6. Licensing process
7. Operations and maintenance optimization
8. Fuel cycle improvements
9. Operating spares assessment
10. Maintaining skills
11. Public acceptance
12. Environmental impact assessment
13. Overall risk assessment

置づけるかの決定は、これらが経済性（発電単価）に及ぼす影響に基づく要因によることが大きいと考えられる。そこで、長寿命化、廃止措置に関するシナリオを設定した上でその費用を推定し、発電単価に及ぼす影響を評価することとした。両者のシナリオは COSMARD により設定し、その結果に基づいて INPLEX を用いて発電単価に及ぼす影響を算出することとした。前述したように COSMARD では解体作業に必要な費用項目を階層状に組み立て、それに要する費用等のプロジェクト管理データを計算する。この手法を長寿命化対策の工事に対しても適用して、その費用を比較的详细に算出することが可能である。また、作業によって生じる被ばく線量や廃棄物の発生量も同様に評価することができる。

4.2 長寿命化が廃止措置に及ぼす影響

長寿命化対策後の原子力発電所の運転期間、解体作業前の密閉管理期間及び解体作業期間の長さがそれぞれ変わった場合、交換した新旧機器に内蔵される放射能量が変化することが考えられる。

交換した機器（旧機器）は、即時処分されるか、一時保管施設に保管され廃止措置で発生する廃棄物の処理処分と同一時期に最終処分されると想定される。新規に交換した機器は、通常の運転期間よりは短い期間中性子照射を受け、同様に廃止措置時に最終処分される。また、長寿命化後も交換せず延長して共用する機器は、通常の運転期間の後に、さらに長寿命化対策後の原子力発電所の運転期間分だけ放射性物質で汚染される期間が長くなることになる。このように長寿命化、密閉管理及び解体作業の期間の長さがそれぞれ変わった場合、機器の放射能や作業環境（線量当量率等）が変わり、それらが各措置期間に発生する費用に影響を及ぼすことが考えられる。

5. PLM データの予備評価

5.1 計算条件

PLM の評価においては、廃止措置と長寿命化の相互関係についての検討が必要である。そこで PLM に必要な主要検討項目を抽出するため以下に示すような予備評価を行った。

被ばく線量

作業者の集団線量当量については、主に外部被ばくの要因となる Co-60 に着目して、炉内構造物と生体遮へい

コンクリートの放射能濃度の変化をもとに、運転期間（20～60 年）と冷却期間を変化させて計算した。

発電単価

長寿命化費用増加要因（13 項目）に通常運転時に対して長寿命化に必要な費用上昇分の推定値を入力し、これらの項目が発電単価に及ぼす影響を評価した。

なお、本評価では 110 万 kW 級の原子力発電所を対象とし、60 年間運転、設備利用率は 75%（一定）と仮定した。また、規制条件を満足するために、安全面での改善に必要な費用は多めに見積もり 400 億円とし、30 年目と 45 年目に使用されるものとした。同様に安全関連でない設備や二次系設備の改善については総額 200 億円とし、30 年目と 45 年目に使用されるものとした。資本費としては、廃棄物と使用済み燃料管理について 10 億円、運転と保守の最適性について 20 億円を想定した。減価償却期間は 16 年で定額償却とした。

廃棄物量

長寿命化対策により交換した機器は、廃棄物として処分する必要がある。特に長寿命化対策では炉心部機器が対象となるため、それらの一部（高β・γ廃棄物）は比較的地下の深い部分に埋設する必要がある、その費用が増大する。そこで、長寿命化対策によって生じる廃棄物を放射能レベル毎に分けて算出することとした。そこで、まず、構造物中の放射能濃度を計算した。構造物中には中性子照射により多くの放射性核種が生成するが、廃棄物処分等の観点から重要な核種に限定して、運転期間をパラメータとした放射能濃度の比較を行った。

5.2 評価結果

放射化した機器・構造物のうち、生体遮へいコンクリート中の放射能濃度の計算結果を Fig.3 に示す。停止後の冷却期間は 5 年とした。運転期間 40 年での放射能に対し、運転期間 60 年では長半減期の核種で約 1.5 倍、Co-60 のような比較的短半減期の核種ではほとんど変わらなかった。いずれの核種も放射能濃度の変化は小さいことが分かる。なお、放射能濃度は冷却期間の長さに依存し、それに比較すると運転期間の違いについては無視できるものである。

他方、均等化発電単価で表した長寿命化による費用上昇計算の一例を Fig.4 に示す。運転開始年基準で 0.21 円程度の上昇が見込まれた。

Fig.3 Radioactivity density in biological shield

5.3 検討

本システムを用いて原子力発電所のライフサイクルに関する経済性評価を行った結果、長寿命化は新規立て替えよりも一般的に有利であり、しかも発電単位の上昇に大きな影響を与えないこと、寿命延長期間が廃止措置費用に及ぼす影響は少ないが、交換した機器の処分費用を廃止措置費用に含める場合には、その影響は無視できないこと、等が明らかになった。

6. まとめ

原子力発電所のより経済的なライフサイクルを実現するためには長寿命化が必要となるが、最適な PLM を計画する上で長寿命化・廃止措置の各々のシナリオに対して、PLM データを算出していくつかのプラントライフシナリオに対する比較により最適な計画を策定することが必要である。そこで、プラントライフの経済性評価計算システム (INPLEX) と廃止措置計画の策定及び管理のための計算システム (COSMARD) を有効に連結して、PLM データを算出するシステムを作成した。予備的な計算では、長寿命化対策は発電単価の上昇に大きな影響を与えないこと、また廃止措置に及ぼす影響も大きくないこと等が明らかになった。今後より定量的に最適 PLM を実現するための経済性評価システムを構築する計画である。

本研究の実施に当り、原研バックエンド技術部の大島総一郎氏、(株) エス・イー・エイの桑原信一氏及び大木慎一氏には計算準備やシステム開発にご協力を頂いた。ここに記して感謝します。なお、COSMARD は科学技術庁からの受託研究として原研が開発したものである。

Fig.4 Calculated cost increase by plant life extension

参考文献

- (1) 高尾、他：火力原子力発電、Vol.45[6], 453 (1994)
- (2) 高尾：原子力工業、Vol.42[12], 52 (1996)
- (3) Takao, T., et al. : SMiRT-15, D04/5, August, 1999
- (4) Yanagihara, S., : J. Nucl. Sci. Technol. 30[9], 890 (1993)
- (5) 柳原敏、他：JAERI-M 94-005, 1994 年 2 月
- (6) OECD/NEA : A proposed Standardized List of Items for Costing Purposes in the Decommissioning of Nuclear Installations, 1999