

# 米・欧・韓の原子力発電所設備利用率向上に向けた取り組み —日本は何を学ぶべきか—◆

永富 悠\* 松尾 雄司\*\* 村上 朋子\*\*\*

## 要旨

近年、エネルギー安全保障及び地球温暖化ガス排出量削減の観点から、原子力発電所の設備利用率の向上策の実施が強く望まれている。2009年の日本の原子力発電設備利用率は64.7%と前年（2008年）の58.0%よりは向上したものの、韓国、米国等の主要国と比較すると依然として低い水準にとどまっている。1990年以降の主要原子力発電国の設備利用率推移を見ると一貫して概ね90%以上の高い水準を維持している国がある一方で、90年代までは日本とほぼ同水準であったが2000年以降上昇傾向にある米国や韓国のような国もある。後者は各国でそれぞれ意欲的な取り組みを実施してきた成果であると言える。

具体的には、米国では、1980年代後半から産業界とNRC（米国原子力規制委員会）とが取り組んできたリスク情報を活用した機器単位での点検頻度合理化や、オンライン・メンテナンスの範囲拡大等が功を奏し、定期的な補修による計画停止時間は年々短縮されてきた。また、発電所内機器のトラブル等の計画外停止時間も、大幅に短縮されてきており、これはトラブル発生率の低減だけでなく補修・復旧時間の短縮化によるものである。米国では、運転サイクル期間の長期化にも取り組んでおり、現在では多くのプラントで18～24ヶ月運転が採用されている。韓国においては、停止時間の低減に向けて、運転技術の向上、機器類の最新技術の導入だけでなく、保守・補修工程プロセスの見直しや作業項目レベルでの改善を含む保守技術の向上に取り組んでいる。

また、諸外国における計画外停止からの通常運転復帰までの事例を見ると、軽微なトラブルの場合は、原因究明の徹底及び再発防止策の完備が必ずしも再起動の必要条件とはなっていない事例が複数の国で見られた。また、今回行った分析の限りでは、諸外国においては一般的に地方自治体が安全性を審査する権限が付与されていないというだけでなく、プラントを再起動し通常運転を再開しても安全性に問題は無いと安全規制当局が判断すれば、可能な限りインフラを活用するほうが合理的、という考え方が深く根付いていることによると推測される。

安全性確保を大前提として、既設原子力発電所の有効活用を図ることが求められる中、いくつかの国では日本と同等の安全水準を達成しつつ10年～20年近くにわたり、80%台後半から90%前半という高設備利用率を継続的に達成しているという事実がある。日本が既設炉有効活用の具体的方策を検討するにあたっては、これら国での取り組みを十分に斟酌すると共に、広くは日本の原子力のあり方、安全に対する考え方に関しても議論していく必要がある。

◆ 本報告は、平成21年度に経済産業省資源エネルギー庁より受託して実施した受託研究「平成21年度発電用原子炉等利用環境調査—原子力発電所の有効活用に関する国際動向等調査報告書」の一部である。この度、経済産業省の許可を得て公表できることとなった。経済産業省関係者のご理解・ご協力に謝意を表すものである。

\* (財)日本エネルギー経済研究所 戦略・産業ユニット 研究員

\*\* (財)日本エネルギー経済研究所 戦略・産業ユニット 主任研究員

\*\*\* (財)日本エネルギー経済研究所 戦略・産業ユニット リーダー

## 1. はじめに

### 1-1 目的

エネルギー安全保障及び地球温暖化ガス排出量削減の観点から、発電中に炭素を出さない原子力発電所は準国産エネルギーと位置付けられ、その有効利用が期待されている。ところが近年、日本の原子力発電所は、その設備利用率の低さが問題視されている。2009 年の日本の原子力発電設備利用率は 64.7%と、中越沖地震の影響が大きかった前年(2008 年)の 58.0%に比べて多少向上したものの、韓国(2008 年・93%)、米国(2008 年・91%)、フィンランド(2008 年・93%)等の原子力発電に関して優秀なパフォーマンスを見せている主要国と比較すると依然として低い水準にとどまっている。一方で、我が国は商業用原子力発電所の導入以来、継続的に軽水炉の活用に関する技術開発を続けており、トラブルによる緊急停止の頻度は他国に比べても少ないことが知られている。

このように我が国は安全性に対して高い技術力を有し、トラブルが少ないにも関わらず、現在の設備利用率は他国に比べて十分なレベルにない。設備利用率の向上を目指した対策を検討するにあたっては、まず、我が国の設備利用率が低迷している理由に関して十分な分析が必要である。このため、我が国と他国の原子力発電所の設備利用率に関する客観的データを比較検討することで、我が国の設備利用率低迷の要因に関して分析を行う必要がある。また、データの比較検討とあわせて、各国で実施されている取り組みやトラブル事例の分析により、設備利用率向上に資する対策の可能性に関して検討する事も重要である。

上記より、本研究では原子力発電所の有効活用に向けた具体的方策の検討に資するべく、設備利用率の低迷の要因と設備利用率向上のための対策に関して、各国で行われている取り組み、具体的な情報・事例を収集し、既設炉の有効活用に向けた問題点を分析し、対策の提言に繋げることとする。

### 1-2 分析対象

本稿では、原子力に関する高い技術力・経験を有し、かつ良好な運転実績を誇る代表的な国として設備利用率が極めて高い米国、韓国、近年では良好な運転実績とまでは言えないが日本よりは高く、かつ趨勢的に向上している原子力大国としてフランス、ドイツ、そして電源の原子力への依存率が高く、かつ比較的良好的な運転実績を誇っている国としてスウェーデンに着目し、これらの国に関して重点的に分析を行うこととした。特に、米国と韓国に関しては設備利用率の向上に関して各種取り組みが進められており、日本の今後の取り組みに関して大きな示唆を与えるものであると考えられる。

具体的には上記の国を対象に、設備利用率に影響を与える要素として各国の運転サイクル期間、各国発電所の原因別停止時間、定期検査期間短縮の取り組み、再起動・復帰までの事例を分析し、日本の原子力発電所の現状と設備利用率向上のための今後の対策に関して何らかの示唆を得るべく検討を行った。

## 2. 分析・考察

本章では、まず設備利用率の推移、運転サイクル期間、原子力発電所の停止時間を大きく左右する運転中の予防保全活動のあり方について各国比較を行う。そして、それらを踏まえた上で、各国における原因別停止時間、計画外停止からの再起動事例をレビューする。特に、近年高い設備利用率を達成している米国と韓国については、両国で進められている取り組みの特徴を深掘りすることとする。

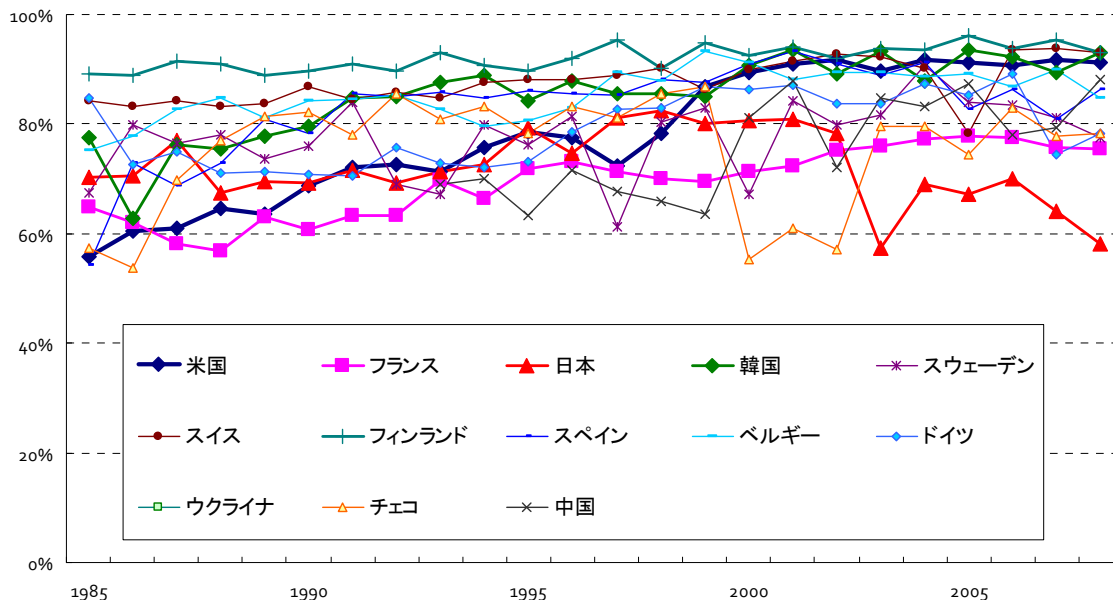
### 2-1 各国比較

各国の原子力発電所の状況を国毎に比較する。代表的な指標として、国全体としての原子力発電所の設備利用率、運転サイクルに関して各種データをまとめ、比較分析するとともに各国の安全規定に関して概観した。

2-1-1 設備利用率の推移

原子力発電所を有している主要国の原子力発電所の平均設備利用率の時系列推移を図2-1に示す。具体的には、米国、フランス、日本、韓国、スウェーデン、スイス、フィンランド、スペイン、ベルギー、ドイツ、ウクライナ、チェコ、中国に関して、1985年から現在に至るまでの設備利用率の推移を示している。

図2-1 各国の原子力発電所の設備利用率の推移<sup>1</sup>



(出所) IAEA, Power Reactor Information System (PRIS), the International Atomic Energy Agency, 2009より作成

日本の設備利用率は、2000年までは上昇傾向にあったものの、2005年前後に大きく落ち込み、その後中越沖地震の影響などもあり低迷を続けている。一方で、米国など上昇傾向にある国には、設備利用率向上を目指して多くの取組みが実施されてきた結果が出ている。設備利用率が一貫して高い国には、運転技術の高さに加えて運転に係る慣習や組織風土等に特徴があり、設備利用率を高く保つことを可能にしている。なお、スウェーデン、スイス、中国、チェコなど年により設備利用率の変動が大きい国もいくつか見受けられる。それらの各国それぞれ特有の事情があり、一概には言えないが日本以外はいずれも基数の少ない国であり、1基でも長期停止したプラントがあると直ちに当該年の平均設備利用率に影響を及ぼすことが、設備利用率の安定していない大きな要因の一つといえる。

日本の近年の設備利用率の低迷は、55基（2009年まで）と基数が多いだけに、1基や2基の単発的要因ではなく、いくつかの構造的要因が重なった結果であろうと推定できる。よく知られている複数基同時長期停止事例としては以下のものが挙げられる。

- ・ 2002～2003年：東京電力（株）における不適切な報告及び保安規定違反をきっかけとした全基停止
- ・ 2005年：東北電力（株）女川原子力発電所の地震による全基停止
- ・ 2007～2009年：東京電力（株）柏崎刈羽原子力発電所の地震による全基停止

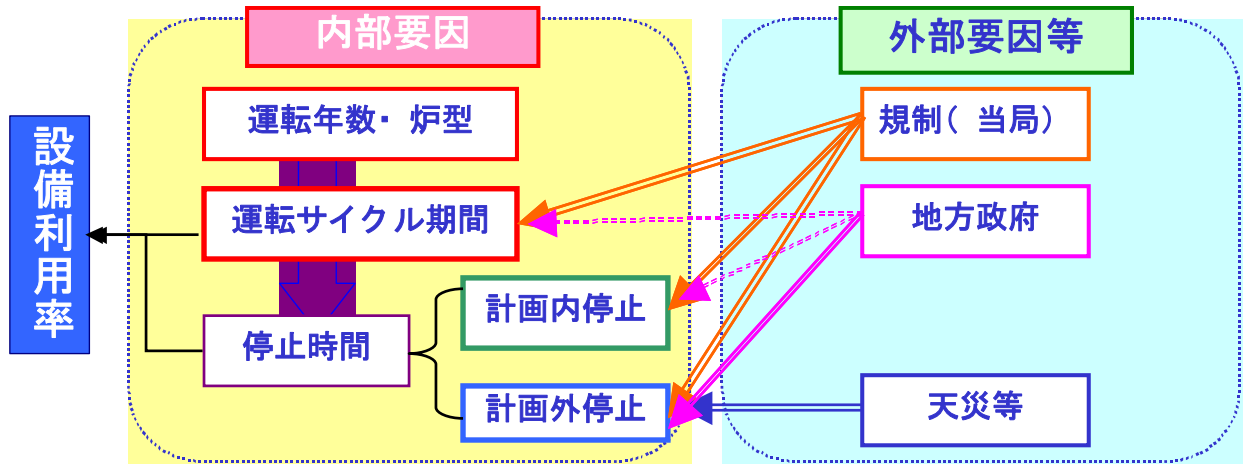
しかし、このような事例だけでは55基・47GW（2009年末）の長期にわたる低設備利用率を到底説明できるものではない。他にも長期停止しているプラントが常に数基あり、それらのいずれにも例えば「地震」、「共通する安全上の問題」といった明確な共通要因が見いだせないにもかかわらず、同水準の技術を有する主要国の中で日本のみ突出して低い設備利用率が続いている要因に関して分析する必要がある。

<sup>1</sup> フランスやドイツの一部などでは、需要の変動に合わせて出力変動運転を行っている発電所がある点には留意が必要。

2-1-2 設備利用率に影響を及ぼす要因について<sup>2</sup>

設備利用率は、発電所の運転サイクル期間と停止時間によって決定される。停止時間には、定期検査などを含む計画内の停止と事故などによる計画外の停止があり、これらは発電所の運転年数や炉型に影響を受ける。また、時間稼働率を決定する運転サイクル期間と停止時間に影響を及ぼす外部要因として安全規制、地方政府、そして地震などの天災があり、これらも結果として設備利用率に影響を及ぼしている。設備利用率に影響を及ぼす各要因の関係は以下のとおり。

図 2-2 設備利用率に影響を及ぼす要因



以下では、設備利用率に影響を及ぼす要因の中でも定量的、客観的な分析が可能である「運転年数・炉型」、「運転サイクル期間」、「計画内停止時間」、「計画外停止時間」を中心に分析を行った。まず、国単位でのマクロな情報として、「運転年数・炉型」、「運転サイクル期間」と、計画停止時間に影響する要因として「運転中予防保全活動 (PMO)」に関して分析した。そして、その上で 2-2 節以降において、より詳細な個別の国毎の具体例に関するミクロな情報の分析として、計画内停止時間、計画外停止時間に関して「原因別停止時間」及び「計画外停止からの復帰事例」に関して分析した。

まず、マクロな情報に関する分析結果を以下に示す。

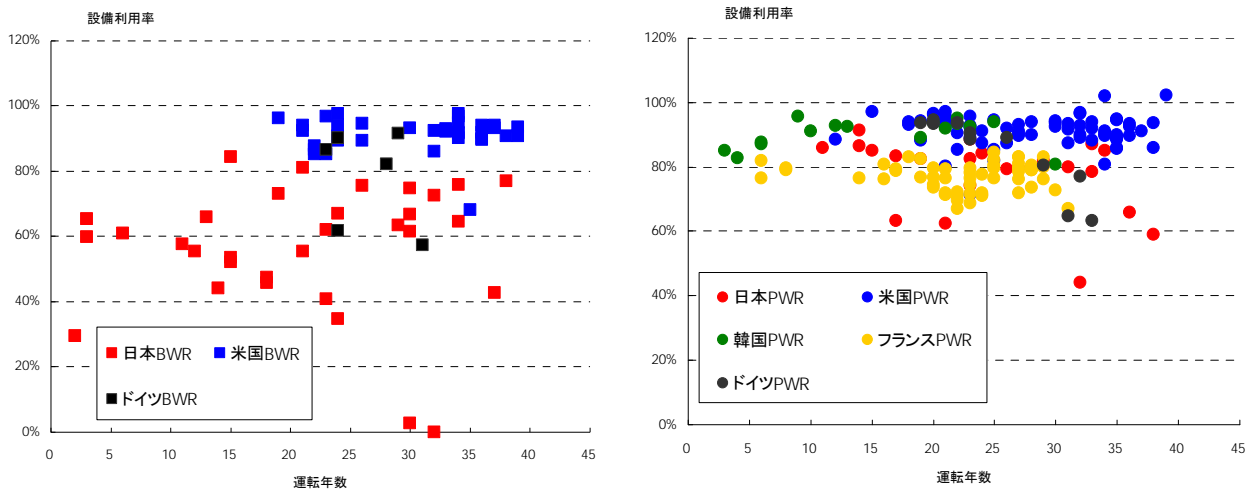
2-1-3 運転年数と炉型と設備利用率

図 2-2 で示した設備利用率に影響を及ぼす要因の中で、日本の設備利用率低迷の要因に関する仮説の一つとして運転年数の影響が挙げられることがある。つまり、日本は原子力発電所の導入が比較的早期であったために、各発電所が高経年化しており、この対策のために定検時間が長くなっているのではないかとのことである。また、日本国内に PWR と BWR の二つの炉型を抱えているため、フランスのように単一の炉型を導入している国よりも設備利用率が低くなっているのではないかとこの仮説もある。

以下では、IAEA の運転実績データベースを基に、これら運転年数と炉型と設備利用率の関係に関する仮説を検証する。

<sup>2</sup>停止時間から定義されるのは厳密には時間稼働率である。時間稼働率は年間 8760 時間中に何時間稼働していたかの割合を指し、設備利用率は設計上の定格出力に対して実際に発電した電気出力の割合を指す。時間稼働率と設備利用率の違いには注意を要するが、両者の差は概ね 5%程度であるため、論旨は変わらない。よって本稿では厳密には区別せず論を進めることとする。

図 2-3 運転年数と設備利用率 (左図 : BWR、右図 : PWR)



(出所) IAEA, Power Reactor Information System (PRIS), the International Atomic Energy Agency, 2009 より作成  
 (注) 2008年までの直近5年平均

上図は日本、米国、フランス、ドイツ、韓国の原子力発電所に関して、プラントごとの運転年数と設備利用率の関係を示したものである。米国及びフランスについては、高経年化によって設備利用率が低下している、という関係性は見い出せない。また、PWR と BWR で比較しても炉型によって設備利用率の違いがあるとは言えない。ドイツに関しては、炉型の違いによる差異はそれほどないものの、運転年数と設備利用率が若干の相関が見られる。これは、同国の脱原子力法によって総発電量が規制されているため、意図的に古い発電所を動かしていない事例などがあるためである。日本のみは、近年運転停止が長期化しているプラントがたまたま BWR に多いため、BWR の設備利用率が PWR に比べて低い傾向にある。また、炉型を二つ抱えていることに関する仮説に対しては、米国、ドイツいずれの例を見ても二つの炉型を持つことが設備利用率の低迷につながるとはいえない。

運転年数及び炉型と設備利用率の関係を考えると、それぞれ各国の事情があるため一概に言えない部分はあるものの、先に挙げた仮説に関して言えば、運転年数及び炉型と設備利用率の間にはそれほど明確な関係性はなく、諸外国と比較した日本の設備利用率が低迷している要因の説明として説得力のあるものとはいえない。

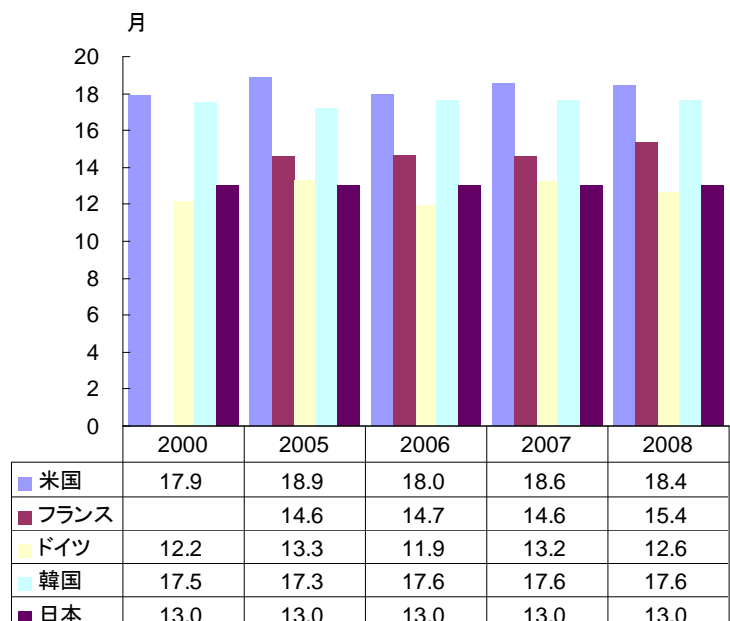
2-1-4 運転サイクル期間

日本、米国、フランス、ドイツ、韓国に関して各国それぞれの原子力発電所の運転サイクル期間の平均値を右図に示す。

右図より、米国は約 18 ヶ月、フランスは約 15 ヶ月、ドイツは約 13 ヶ月、韓国は約 17.5 ヶ月、日本は約 13 ヶ月となっている。また、各国別に時系列で見ると、各国とも長期的に見てサイクル期間は延長される傾向にある。

運転サイクル期間に対して、各国の 2008 年の設備利用率は、米国が約 91%、フランスが約 76%、ドイツが約 78%、韓国約 93%、

図 2-4 各プラントの平均運転サイクル期間 (単位 : 月)



(出所) 日本原子力産業協会、世界の原子力発電開発の動向より作成

日本は約58%となっている。後述するが、運転サイクル期間の長さや設備利用率は有意に比例関係にあると考えられる。

2-1-5 運転中予防保全活動に関する各国の方針

一定水準以上の安全系機器はプラント運転中、常に待機状態でなくてはならないことから、重要な安全系機器の点検保守はプラント停止中に行うことが基本となっている。しかし安全要求に合致する、すなわち安全性を損なわない範囲でなら、プラント運転中に待機除外（オフライン）にして点検保守が可能になれば、停止中の保守点検点数が低減でき、設備利用率向上につながる、とする考え方は1990年代から議論されていた。これらの活動は、各国の保安規定によって定められている。このため保安規定は、設備利用率に大きく影響する計画停止時間（主として点検・補修、燃料交換にかかるもの）を決定する要素である。

特に、停止中、あるいは運転中オフラインにして点検すべき安全系機器の種類や数に係る規定及びその運用状況は、計画停止期間に直結するものだけに、各国間の違いは重要である。ここでは、OECD/NEA<sup>3</sup>の「点検ワーキング・グループ」が2001年8月に取りまとめた報告書<sup>4</sup>に沿って、各国の取組みの比較を行った。

それを実施に移す国が徐々に現れてきたことからNEAが各国の現状比較を行い、とりまとめたものである。下表に運転中予防保全活動（Preventive Maintenance during Operation、PMO<sup>5</sup>）に係る規制・運用方針及び現状の比較を示す。

表2-1 各国の運転中予防保全活動（PMO）に関する方針及び現状の比較

	ベルギー	チェコ	フィンランド	フランス	ドイツ	スペイン	スウェーデン	スイス	米国	日本
PMOに関する国の方針	基本的に認めない	安全基準に適合すればOK	規制機関の個別承認が必要/AOTのPMOへの適用は不可	TSで定めればAOT適用可	連邦政府安全局による推奨規定あり	TSで定めればAOT適用可	TSで定めればAOTのみ許可	TSで定めればAOT適用可	事業者がリスク評価を実施すればOK	認めない。TSで定めればAOTのみ許可
事業者の方針/導入計画	なし	なし	導入済み	リスク分析の上で判断	事業者が規定に沿って判断	将来は検討	将来は検討	4系統安全系で導入	近い将来導入されると期待	事業者が導入検討の予備調査中
安全評価	なし	事業者が実施、安全機関が承認	事業者が実施、安全機関が承認	事業者が実施、安全機関が承認	事業者がTSに沿って実施、安全機関が承認	事業者が実施、安全機関が承認	事業者がTSに沿って実施、安全機関が承認	安全機関が承認	事業者がTSに沿って実施、安全機関が承認	事業者がTSに沿って実施、安全機関が承認
AOTの上限の有無	TSにて規定	規定あり	PSAIによる	TSにて規定	TSにて規定	TSにて規定	TSにて規定	規定あり	TSにて規定	TSにて規定
そのための規制適用手順	特になし	定期試験	内規あり	特になし	推奨規定に沿ってTSを規定	規定あり	規定あり	規定あり	検査プログラム(規定)	特になし
事業者の適合性の認証方法	事業者の点検計画を審査	現地駐在検査官による日次立会検査	現地駐在検査官による週立会検査	定期検査	独立した第三者専門家がサイト常駐	規制機関が事業者の報告書をチェック	規定で判断	規定で判断	現地駐在官による定期検査	書類適合審査

(出所) OECD/NEA 報告書、"Inspection of Maintenance on Safety Systems During NPP Operations " August 2001

(注) AOT : Allowed Outage Time、待機除外許容時間。安全性を損なわない範囲で安全系機器を待機除外にすることが許される時間。

TS : Technical Specification、技術仕様書。機器や系統の運用、点検、保守に係る要件が記述してある。

この資料から、既にこの比較分析の行われた2000年にはフィンランド、スイスでPMOが導入されていたことがわかる。ベルギーのように基本的に認めない国もある一方、ほとんどの国はTSで定める、あるいは安全規制期間の定める安全基準に合致することを条件として適用可としており、実際に導入済みかどうかに関わらず、各国とも条件付で導入を認める方針であったこともわかる。実際、この取りまとめ時期と前後して米国ではリスク情報を活用したPMOの対象の拡大が行われており、米国の計画停止時間短縮に貢献している。

以上から、PMOの適用は設備利用率向上に寄与する有力な要因であり、米国、フィンランド等の高い設備利

<sup>3</sup> The Nuclear Energy Agency (NEA)はOECD内に作られた組織。

<sup>4</sup> Nuclear Energy Agency (NEA)、Committee on Nuclear Regulatory Activities、Working Group on Inspection and Practices、"Inspection of Maintenance on Safety Systems During NPP Operations " August 2001

<sup>5</sup> 日本や米国等で通常言われる” Online Maintenance (OLM) “、あるいは” In-Service Inspection (ISI) “と同義と考えてよい。

用率を可能にする大きな要因となっている。日本ではこの時期、事業者及び規制機関による予備的調査の段階であったが、既にこの段階でPMOを認めるための要件（安全担保の手法、事業者の適合性の認証方法など）は基本的に諸外国と同様であった。すなわち考え方や規制要件については諸外国の情報を十分に認識しながら、導入に向けたそれ以上の前向きな取組みは行われなかったともいえ、2010年4月現在、ようやく導入に向けた検討が動き出している。

## 2-2 各国の原因別停止時間と計画外停止からの再起動事例

設備利用率の違いは、つまりは発電所の停止時間の違いに由来する。本項では、IAEAの“Operating Experience with nuclear power stations in member states”各年版を基に、各国の発電所一基の平均停止時間に関して原因別に分類した。IAEAでは図2-2で示した計画外停止を、更に外部要因とそれ以外の計画外停止に分類しており、停止原因は以下の三つの要素に大別される。

- ・ 計画内停止：プラント補修などの計画内で管理する事が出来る停止補修（定検等）
- ・ 計画外停止：計画外だが、管理する事が出来る停止（装置トラブル等）
- ・ 外部要因：管理の範囲を超えた要因による停止（地震等）

以下では各国別の原因別停止時間及び計画外停止からの復帰事例に関して示す<sup>6</sup>。

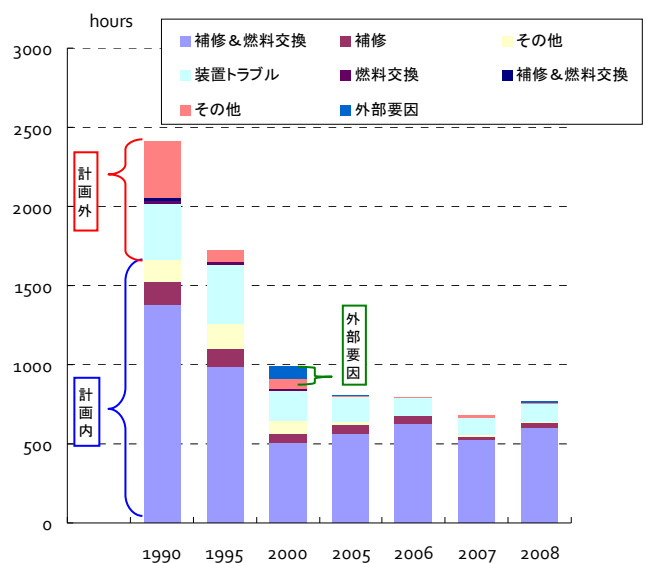
### 2-2-1 米国

#### (a) 原因別停止時間

1990年の2,417時間をピークに停止時間は一貫して減少傾向にある。これには、NRCを始めとした関係機関の継続的な努力が大きく寄与していると考えられる。

原因別で見ると計画内停止、計画外停止とも減少している。これより定検作業の短縮に加えて、各種トラブル頻度の減少及びトラブル時の復帰時間の短縮等により、全ての面で既存発電所の効率的運用に向けた改善が進んでいることが伺える。具体的には後述するとおり、リスク情報を活用した機器単位での点検頻度合理化や、オンライン・メンテナンス（PMO）の範囲拡大、運転サイクルの長期化等により、定期的な補修による停止時間は年々短縮され、設備利用率は向上している。また、発電所内機器のトラブルや、送電線電圧低下等の外部要因による計画外停止も、大幅に時間が短縮されており、トラブル発生率の低減のみならず、補修・復旧時間も短縮化の方向にあることが伺える。この結果として、1990年代では日本と同程度であった米国の設備利用率は、停止時間を大幅に短縮し、2008年現在では世界でも有数の良好なパフォーマンスを示している。

図 2-5 原因別停止時間（米国）



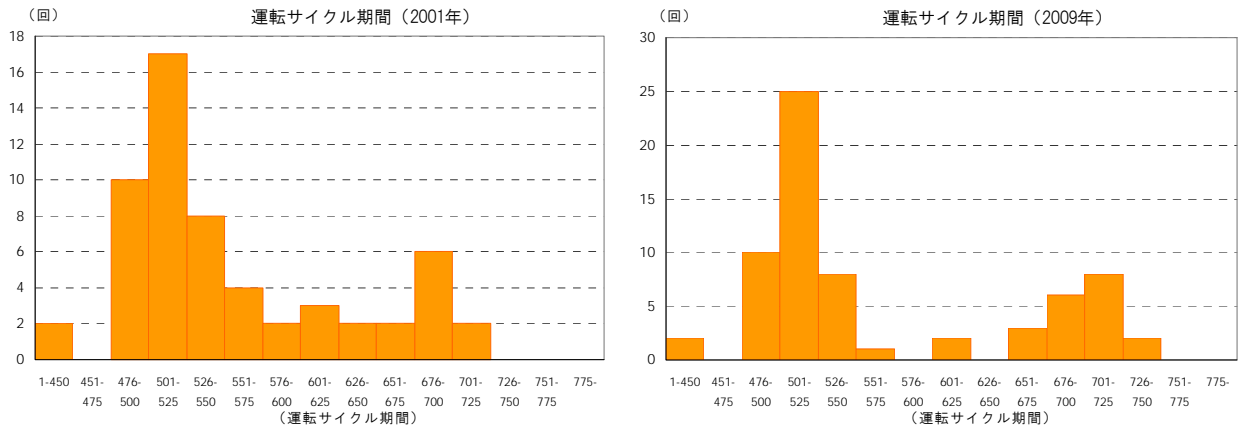
#### (b) 運転サイクル

本項ではNRC（米国原子力規制委員会）が発表しているデータ<sup>7</sup>を基に、米国における運転サイクル期間実績及び停止期間を集計し、とりまとめた。図2-6に米国の運転サイクル期間実績の推移を示す。

<sup>6</sup> 調査に合わせて実施したヒアリング情報も含む。

<sup>7</sup> <http://www.nrc.gov/reading-rm/doc/collections/event-status/reactor-status/>

図2-6 米国のプラント別の推定運転サイクル期間実績の推移（左図：2001年、右図：2009年）



2001年段階では、運転サイクル期間として501-525日間（約17ヶ月）、ついで676-700日間（約23ヶ月）が多い、当時は特に18ヶ月サイクルを中心として運転管理がなされていたと推測され、運転サイクルとしては18ヶ月もしくは24ヶ月の期間で運転されている事が裏付けられたと考えられる。また、2009年段階でも501-525日間（約17ヶ月）、ついで701-725日間（約24ヶ月）が多いが、2001年と比較すると18ヶ月と24ヶ月の中間の運転サイクル期間が減り、650日以上長期サイクルが増加していることから、より長期の想定運転サイクル期間が増加していることがわかる。

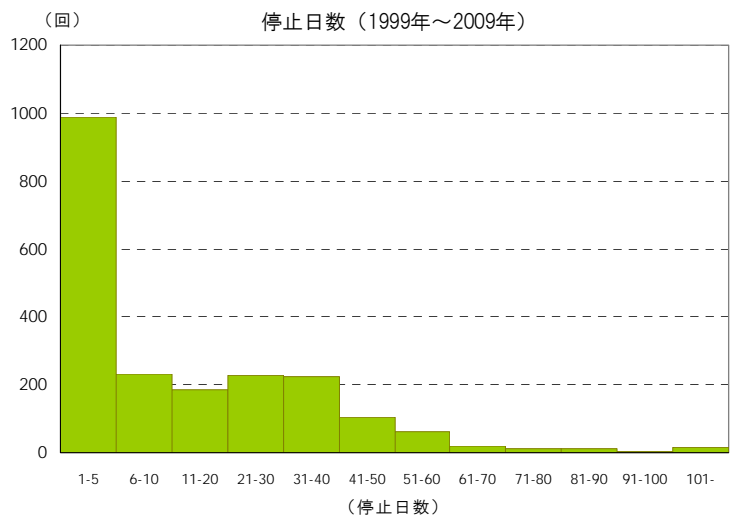
2009年では726日を越える超長期の運転サイクル実績が出てきていることも注目に値する。この年に1サイクルを終了したプラントで最高の運転サイクル期間を達成したのは Brownsferry2号機で、2007年4月17日から2009年4月25日までの740日間、丸2年を超える長期サイクルであった。この間停止した回数及び日数は、3日停止が1回、4日停止が2回、5日停止が1回、計4回16日であり、非常に良好なパフォーマンスであったといえる。

また、図2-7に1999年～2009年の停止日数を示す。1～5日程度の停止で留まる事例が圧倒的に多く、それ以外でも概ね、60日以下の停止日数が大半を占めている。定検や燃料交換以外の計画内・計画外の補修などを含めても、停止日数の大半は2ヶ月以下にとどまっており、長期停止に至る事例はほとんどみられない。これは「計画外停止からの再起動事例」で後述するとおり計画外停止した場合でも、その停止原因に問題を絞って補修・交換を行い、停止している理由が無くなった段階で迅速に起動しているからであろうと考えられる。

上記の通り、米国の運転実態を分析すると以下三点の事実が類推される。

- ・ 2001年から2009年の間でより長期間での運転サイクルが実施されている。（運転サイクル期間の延長）
- ・ 定期検査を含めても停止日数が短く70日以上停止はほとんどない。（定期検査期間の短縮）
- ・ 小さなトラブルであれば5日以内で再起動する。（復帰までの時間の短縮）

図2-7 米国のプラント別の推定停止日数（1999-2009年）





(c) 再起動要件及び計画外停止からの再起動事例

米国では、トラブルが軽微で速やかに終息した場合は事業者が自主的に対応措置を行い、トラブル停止後の運転再開の判断は基本的に事業者の責任で行われる（オペラビリティ判断、是正措置等）。このような事業者の対応を常駐検査官が日常の検査活動を通して観察している。問題が重要で複雑な場合、又は問題を繰り返す等のパフォーマンス低下が見られる場合は、NRC が事業者の対策を確認し、合意内容を記載した確認措置レター（CAL）を事業者に送付する。NRC は、事業者が CAL の内容を完了することを検査で確認する。このレベルでは事業者が自主的に運転を停止しているケースが多く、CAL 完了が再起動の条件になることが多い。

事業者のパフォーマンスが顕著に低下し特別の監視が必要とされる場合、又はパフォーマンスが許容できない程度低下し NRC が運転停止命令を出した場合等には、IMC 0350<sup>8</sup>「パフォーマンスの問題を伴う停止中の原子炉の監視」の下で監視が行われる。この場合は、監視パネルが運転再開チェックリストを作成し、事業者の改善措置の進捗状況を監視する。運転再開チェックリストに基づき準備が整ったと判断されれば、NRR（Office of Nuclear Reactor Regulation、原子炉規制局）局長及び地方局長の承認をもって運転再開が認められる。

上記の通り、再起動については安全性の問題に起因するものが大半であるため、原子力発電所の安全性について米国で唯一規制権限を有する NRC が事業者を検査・監視し運転再開する手順となっており、原則としてその他の組織による介入はない。

以上の再起動手順に沿って行われた計画外停止からの再起動措置例として、Perry 1 号機の事例(2009 年)<sup>9</sup>を示す。

Perry 1 号機は、2009 年 10 月 15 日、非常用給水ポンプトリップが起因事象となって原子炉手動停止した。これは、発見された事象に対する補修時間が TS で定められている作業時間内に収まらない可能性があったため、原子炉を停止して作業する必要があることによる。その後、点検作業、代替設備の準備などを進め、停止から 6 日目に相当する 10 月 21 日にポンプの補修を完了、11 月 2 日に再起動操作を開始し、11 月 7 日には出力 100% に達している。NRC は、同事象の原因に関してポンプの電源ケーブルの製造過程における不具合であると断定している。表 2-2 に NRC のイベントレポートを基に、原子炉停止から復帰までの作業概要及び原子炉の出力の推移の概要を示す。

表2-2 Perry 1 号機の計画外停止からの再起動事例

2009 年	10 月	15 日	試験中の非常用給水ポンプトリップが発見され、原子炉を手動停止
		16 日	原子炉停止完了
		19 日	原子炉は Mode3 で待機、その後 Mode4 に移行
		21 日	崩壊熱除去の代替設備の完成
		28 日	ポンプの補修及びテストを行い、運転可能に
	11 月	2 日	再起動開始
		7 日	出力 100%

(出所) NRC イベントレポートより作成

この他、2009 年の Peach Bottom 3 号機の事例<sup>10</sup>においても、計画外停止から 1 週間以内で再起動している。これらの事象はいずれも原子炉の安全設備が損なわれたものではなく、原子炉周りの補修が必要なものではなかったことも早期再起動を可能にした要因であるといえる。

米国ではこのように軽微な計画外停止においては、問題を限定し、過去の類似のトラブル復帰事例を参考とし

<sup>8</sup> IMC-0350 は NRC が規定する調査マニュアルの該当記載がある章番号(NRC Inspection Manual Chapter 0350)

<sup>9</sup> NRC ホームページより Licensee Event Report、

<https://nrc.nrc.gov/secure/lsearch/index.cfm?fuseaction=SearchResults.showLER&doc=4402009003R00.pdf>

<sup>10</sup> 2009 年 1 月 19 日に主変圧器においてトラブルが発生したため出力が低下した。これに対して、変圧器の交換を行うために 1 月 19 日から原子炉を停止し、作業を行った。1 月 30 日に再起動。

て、速やかに補修作業を実施した後は、これ以上停止しておく必要はないとして迅速に再起動している例が非常に多い。

(d) 設備利用率向上の取り組み

以上の通り米国では、設備利用率に影響を与える要因として「長期サイクル運転」、「燃料交換停止期間短縮」、「計画外停止期間短縮」について、改善のための取り組みを進め、段階的に設備の信頼性の向上と設備利用率の向上を同時に実現した。この背景には米国における規制緩和の流れの中で、コストと効率性の向上を目標として、NRC が積極的に取り組んできた事も挙げられる<sup>11</sup>。

NEI（原子力エネルギー協会）による産業界の統一された意見の発信と NRC との意見調整という、産官の連携した取り組みも重要な要因である。事業者自身も、リスク情報を活用したオンライン・メンテナンスや状態監視保全の実施による停止期間短縮・許容待機除外時間（AOT）の延長を進めるとともに、INPO（原子力発電運転協会）では運転経験情報の分析、評価、共有及び技術支援を進めてきた。

規制側においても、OIG（監査局）の監査結果を反映した検査制度の見直し、確率論的リスク評価等を取り入れた「科学的・合理的な安全規制」の徹底、民間の自主性に委ねた運転保守の向上や具体的規格の整備など、産業界の動向と整合した取り組みを進めている。一例を挙げれば NRC は、段階的にリスク抑制手法を整備することでオンライン・メンテナンスの対象を段階的に拡大しており、2000 年の 10CFR50.65「原子力発電所の保守の有効性監視に関する要件（保守規則）」の改定に伴って、メンテナンス実施前の評価を事業者に義務付けるとともに、実質的に複数系統同時のオンライン・メンテナンスを可能とした<sup>12</sup>。

このように米国では、継続的かつ段階的に設備利用率向上のための先進的な取り組みを進めており、これらの取り組み全ての包括的な結果として、現在の高パフォーマンス実績があるといえる。

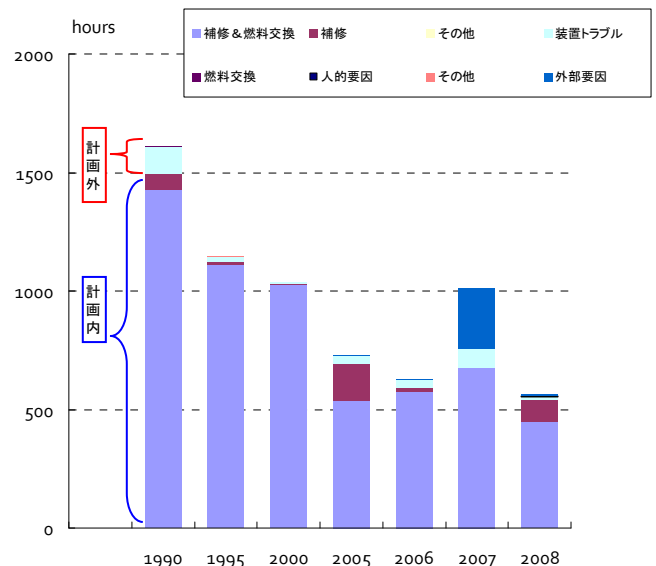
2-2-2 韓国

(a) 原因別停止時間

1990 年から 2006 年にかけて大幅に停止時間が短縮されている。この間で停止時間は概ね半減していることがわかる。その後 2007 年、古里 1 号機に関する廃止の是非を巡る政策的議論による長期停止が平均停止時間に影響を与えているものの、韓国のプラントの停止時間は総じて短く、特に計画内停止の時間が短い。更に、計画外停止による停止時間もほとんどなく、トラブルなくかつ定検作業を短く済ませることで、非常に高いパフォーマンスを示している。

韓国では、トラブルなしでワンサイクルを運転する OCTF(One Cycle Trouble Free)運転を効率的な運転の指標として目標に掲げており、2008 年末までに 67 回の OCTF を達成している。詳細は韓国水力原子力会社 (KHNP) の HP<sup>13</sup>にてその実績を確認できる。以下では、このような計画停止期間短縮に関する取り組みの詳細、及び計画外停止からの復帰事例について述べ、韓国の高設備利用率の要因を抽出・評価する。

図 2-8 原因別停止時間（韓国）



<sup>11</sup> 山田英司他、「復活する米国原子力産業—科学的合理性に基づく規制へ向けた改善の道のり—」、季報エネルギー総合工学 Vol29、No.2 (2006)  
<sup>12</sup> 総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会 原子炉安全小委員会運転管理WG（第2回）、2009年7月24日  
<sup>13</sup> <http://www.khnp.co.kr/en/030003>

(b) 停止期間の短縮化に向けた取り組み<sup>14</sup>

韓国は、継続的に設備利用率の向上に努めており、停止時の「平均停止日数」は欧米各国よりも短い。停止期間が短い理由としては「保守・運転技術の改良」、「機器の改良」、「停止管理プロセスの開発」の3つの点が挙げられる。表2-3に韓国内での停止時間の最短記録と世界の代表的な発電所の停止の最短記録を示す。KHNPは設備利用率の更なる向上を目指して最短記録を持つ発電所の実績を分析し、自国へのフィードバックを進めている。

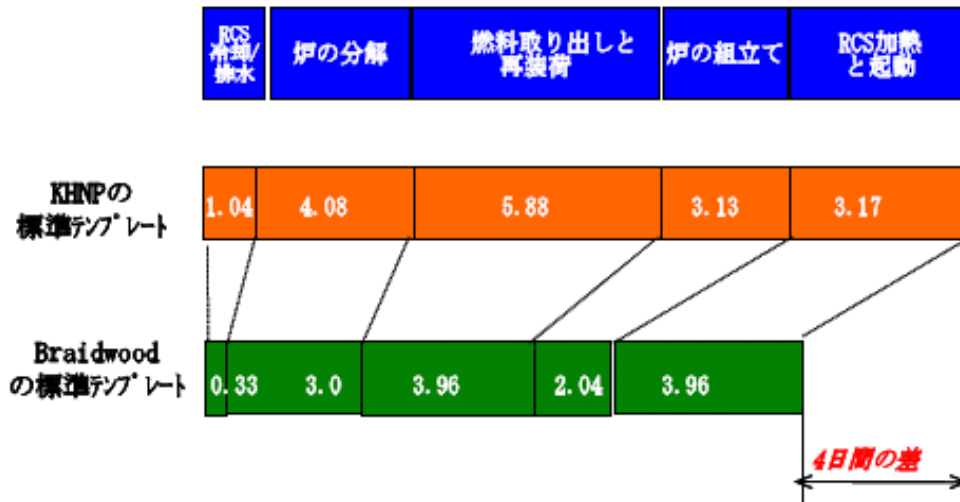
表2-3 KHNPの停止期間の最短記録と世界の実績比較

国名	年	プラント名	炉型/容量	期間(日数)
韓国	2009	蔚珍3号機	OPR1000/100万kW	24.9
韓国	2008	古里1号機	PWR(その他)/58万kW	19.6
韓国	2003	月城4号機	CANDU/70万kW	18.7
ベルギー	2001	Doel2号機	PWR/41.2万kW	15.1
米国	2003	Braidwood2号機	PWR/125.8万kW	15.3
米国	2002	Turkey Point4号機	PWR/72.6万kW	15.6

(出所) 日本原子力産業協会、「韓国の原子力発電所の高稼働率に学ぶ—日韓原子力産業セミナーでの韓国水力原子力(株)の報告から—」、2009年11月より作成

韓国では、各プラント運転チームが停止スケジュールを策定する際の基本的手法として、最短作業完了時間をベースに各工程の標準作業時間を表示する「標準テンプレート」を使用し、定期的に更新している。このテンプレートにより、特定の作業について、これまでの当該作業の実施記録とチームの作業の進展状況が比較できる。特に原子炉冷却系の冷却と排水にかかる時間等を大きく短縮した結果、合計作業時間が約30時間程度短縮されている。また、このテンプレートを用いて、図2-9の通り米国での最短実績を持つBraidwood発電所(120万kW超×2基)とも比較を行っており、その結果、KHNPでは米韓でまだ4日間の差があり、更なる短縮が可能であると分析している。

図2-9 停止作業の標準テンプレートを用いた停止時間差異分析



(出所) 日本原子力産業協会、「韓国の原子力発電所の高稼働率に学ぶ—日韓原子力産業セミナーでの韓国水力原子力(株)の報告から—」、2009年11月より

将来的に停止時間を更に短縮するために韓国では「9402」を目標として推進している<sup>15</sup>。これは韓国標準型炉

<sup>14</sup> 日本原子力産業協会、「韓国の原子力発電所の高稼働率に学ぶ—日韓原子力産業セミナーでの韓国水力原子力(株)の報告から—参照  
<sup>15</sup> 第30回日韓原子力産業セミナーにおいて(2009年10月26-27日)、韓国水力原子力(株)保守計画・エンジニアリング部長が言及。

の OPR1000 炉において、安全性と信頼性を確保した上で、「設備利用率 94%、停止回数 0.2 回/基」を 2014 年に達成するという目標である。具体的方策は、オンライン・メンテナンス(OLM)と AOT の延長、燃料交換プロセスの改善、予防保全テンプレート (PMT) の適用、炉ヘッドの改善、使用済燃料プールの冷却能力の拡大、停止最適化の追加可能性のレビュー等である。これを達成することによって KHNP は、燃料交換停止期間は平均 21 日になると試算している。

更に、長期メンテナンス計画に関しても 10 年単位で最適化する計画を掲げている<sup>16</sup>。具体的には、「燃料交換+容器・材料監視+改修」で 10 年間に 7 回の停止を計画し、そのパターンの最適化を試みている。その最適化されたプロセスに沿って国全体で長期計画を策定し、作業を実行する中で作業の進捗を随時、管理することでより円滑に作業を進めることとしている。例えば、複数の契約会社が作業を行う現場では、KHNP の担当部署（機械、電気、計装制御等）が調整を行うとともに、「停止管理センター」が「スケジュール管理（含外部契約会社の人員）」、「異物混入防止」、「作業区域管理」、「産業安全」、「運転支援」の各チームの工程管理を統括するために設置され、最適パターンの作業を達成するべく管理を行っている。

上記のように韓国では、米国を中心とした原子力先進国のモデルケースを検討した上で、自国炉との比較分析を進め、改善余地の検討を行っている。また、これらに加えて独自の長期計画を策定することで更なる効率改善を目指して努力を続けている。近年の世界最高水準の設備利用率はこの成果の一端であり、今後もこの活動が継続される限り、引き続き高い成果が期待できるであろう。

(c) 計画外停止からの再起動事例

韓国では計画停止時間だけでなく、計画外停止時間も非常に短い。本項ではその迅速な再起動事例として、2008 年 6 月に起こった古里 3 号機の事例からポイントを抽出・評価する。

2008 年 6 月 6 日（金）21 時 17 分頃、正常運転中だった古里 3 号機の蒸気発生器 B の水室排水配管の排水弁の溶接部から漏洩が確認されたため、発電事業者はこれに対する整備を行うため原子炉を手動停止した。同事象は、報告・公開規定に沿って原子力安全技術院による現地調査が実施され、更に、古里 3,4 号機の運転技術ガイドラインの第 3 編（原子炉施設の運転管理）の 3.2（原子炉停止後の措置）第 1 項による安全関連重要事象に該当するとして、原子力安全技術院は再起動事前安全性確認の技術検討を行った。

表2-4 古里 3 号機の計画外停止までの経緯

2008 年	5 月 31 日	2 : 20	第 18 回計画予防整備後、原子炉臨界
		4 : 06	系統併入
	6 月 2 日	18 : 10	原子炉出力 100%到達
	6 日	12 : 10 頃	原子炉冷却材系 (RCS) 漏洩可能性を認知 (主制御室の運転員は、化学・体積制御系の体積制御タンク (VCT) 水位の異常を確認し、RCS の漏洩可能性を認知している。)
		14 : 37~	3 回にわたり、漏洩部位を確認するための点検を実施
		21 : 17	蒸気発生器 B の水室排水配管の排水弁 (BB-V073) 溶接部から原子炉冷却材の漏洩を確認
		22 : 00	運転技術ガイドライン-3.4.13 項に従い、原子炉の手動制御停止を決定。
	7 日	1 : 27	原子炉の手動制御停止

(出所) ヒアリング情報

現場調査チームは、再起動事前安全性評価を行うため、再起動点検表 (Restart Checklist) をまとめて、発電事業者にこれに対する自主的な点検及び評価結果の提出を要求した。表 2-5 にその再起動点検表を示す。

<sup>16</sup> 第 30 回日韓原子力産業セミナーにおいて(2009 年 10 月 26-27 日)、韓国水力原子力(株) 保守計画・エンジニアリング部長が言及。

表2-5 再起動決定に向けた事前確認必要項目

順序	内容
1	事象当時、運転員措置の適切さ
2	原因分析/評価方法の適切さーソケット溶接部の貫通欠陥
3	安全関連需要機器の健全性ー類似部位 (安全等級 2 インチ未満の小口径配管ソケット溶接部)の健全性
4	事象の影響評価の適切性 ー原子炉冷却材の総漏洩量評価 ー放射線影響評価 (所内/外) ー作業員の被ばく線量
5	再発防止対策の適切さ

(出所) ヒアリング情報

調査チームはこれらの項目に沿って確認を行い、3 日後にはその結果と評価を発表した。この評価を受けて同発電所は 2008 年 6 月 12 日から原子炉を起動し、通常運転への復帰プロセスを進めた。

本事象は SG 水室配管からの一次系冷却材漏洩でありながら、事象発生から 1 週間で通常運転に復帰した事例である。その間、事業者は該当部位のみならず、関連する類似部位の数十点における健全性確認を行っており、その対応の迅速さと緊密さの水準は相当高い。韓国では、このような事象の場合、事業者 (KHNP) が再起動判断できることとなっており、当該プラントの安全性確保のみが再起動要件となっているため、根源的な原因究明及び再発防止対策の実施完了が無くとも事業者の判断で再起動が可能である。当該プラントの安全性確保と長期的な保守活動とを区別する合理的な考え方は、欧米諸国とも共通するものであり、日本としても参考になり得ると考えられる。

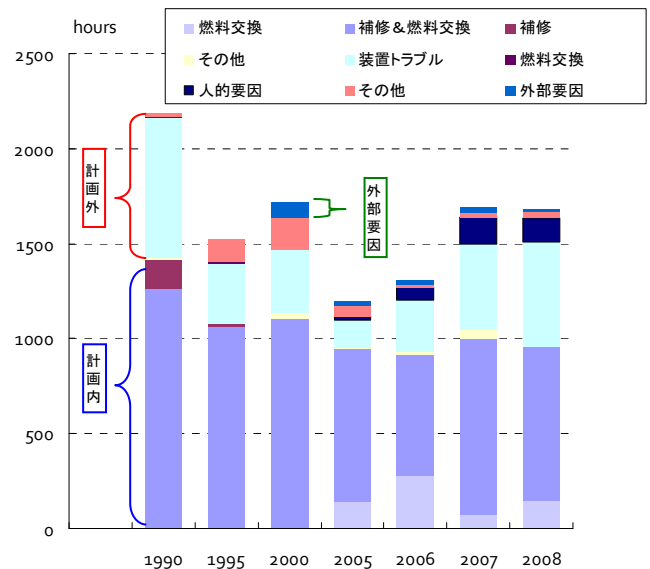
### 2-2-3 フランス

#### (a) 原因別停止時間

1990 年から 1995 年にかけて大幅に停止時間が短縮されており、また、2000 年から 2005 年にかけても更に短縮されている。EDF は 1999 年から 2006 年にかけて、合理的な停止時間短縮の取組みプログラムを実施<sup>17</sup>しており、これが効果を発揮しているものと考えられる。

ただし 2007 年以降は装置トラブルや従業員のスト等によって、停止時間、特に計画外停止時間が増加する傾向にあり、2008 年の停止時間は 2000 年の水準まで戻ってしまっている。この事態を受け、EDF 等の各事業者は計画停止時間短縮のため、米国で導入済みの Risk Informed Operation の積極的な導入を検討しているが、これには十分なリスク情報と設備のパフォーマンスデータが必要になるとして、現在はプラントメーカーや安全規制当局と議論をしている段階にある。

図 2-10 原因別停止時間 (フランス)



<sup>17</sup> 60 年の運転期間を考慮した大型部品の交換計画を含む長期補修計画の立案、予防保全活動などを行っている。

(b) 計画外停止からの再起動事例

2008 年の Tricastan2 号機におけるトラブル事例を時系列的に示す。

2008 年 9 月、停止中であった Tricastan 2 号機 (PWR, 955MW) において、燃料取り出しの準備中に燃料集合体 2 体が異常な状態 (位置) にあることがわかり、作業を中断することになった。

表2-6 Tricastan 2 号機の計画外停止からの再起動事例

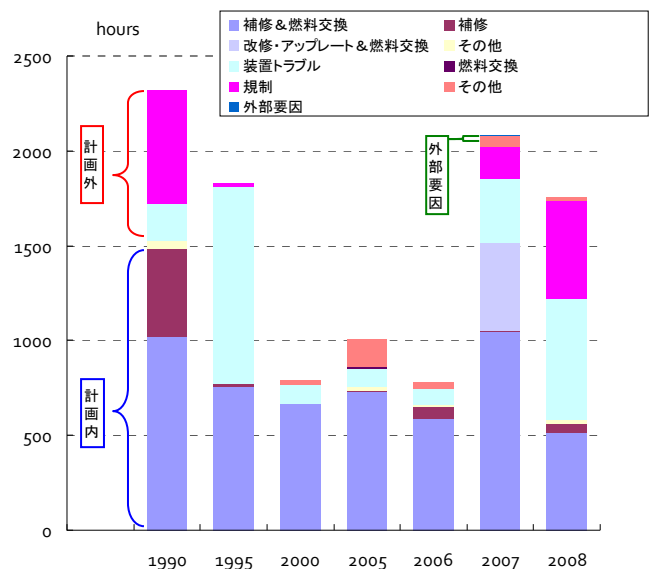
2008 年	9 月	8 日	事象発覚
		17 日	安全規制機関 (ASN)、事業者を抜き打ち検査
		22 日	EDF、対応案の検討開始
		26 日	修復作業準備開始と安全解析実施、問題なしと確認、再発防止策検討
		29 日	落下燃料集合体の回収作業方法検討
		30 日	落下燃料集合体の回収作業方法決定
	10 月	17 日	PWR 試験センターにおいてフルスケール試験を実施、手順の妥当性確認
	11 月	3 日	再発防止策の検討
		12 日	再発防止策の検討
	12 月	8 日	再発防止策の検討
	-	ASN、EDF に Tricastan 2 号機の再起動許可 <sup>18</sup>	

(出所) EDF プレスリリース、JNES 海外規制関連情報、ASN 資料 “Activities regulated by ASN” Chap.12、PP.341 “Blockage of two fuel assemblies during core unloading of the Tricastan 2 reactor”、その他ヒアリング情報

事象発覚以来、プラント運転者 (EDF) が一貫して対応方針を主体的に定め、規制機関がそれを審査し、事業者の提出した計画に基づき安全規制機関立会いのもとで試験等を行い、規制機関が再起動の可否及び再発防止策を判断するという役割分担が明確になっている。本事象は国際安全基準では INES-1<sup>19</sup>であり、原子炉安全及び周辺への放射線影響の観点からは軽微であったが、EDF も ASN も、本事象の詳細な情報収集及び解析、他プラントへの水平展開、及び再発防止策立案を行っており、安全が確認された時点で直ちに再起動を行っている。

EDF 及びフランス政府原子力局 CEA では、その思想を「発電所は重要なインフラであり、その合理的な活用は国益に適合している」<sup>20</sup>と説明している。

図 2-11 原因別停止時間 (ドイツ)



2-2-4 ドイツ

(a) 原因別停止時間

1990 年から 2006 年にかけて停止時間は概ね三分の一まで短縮された。2007、2008 年を除けば、傾向として計画内停止時間、計画外停止もともに着実に短縮傾向にあると言える。

しかし、2007、2008 年は停止時間が大きく増加している。これは、KRUMMEL 発電所と BRUNSBUTTEL 発電所がトラブルのため年間を通じて停止した後、事実上補修を終えているものの、脱

<sup>18</sup> 厳密な再起動日は不明であるが、IAEA データベースによると、2008 年のトリカスタン 2 号機の計画外停止時間は 1.924 時間であり、事象発覚日が 9 月 8 日であったことから、同機は年内に再起動したものと考えられる。

<sup>19</sup> INES: International Nuclear Event Scale、国際原子力安全尺度 (安全基準)。放射性物質の放出の有無、多重防護システムの破綻、従業員の被ばく等の基準で判断される。INES-3 以下が Event と呼ばれ、INES-4 以上が Accident (事故) である。

<sup>20</sup> CEA 関係者へのヒアリング情報による。

原子力法に拠る閉鎖を回避するため、補修後も意図的に停止が継続されたものである。このように、脱原子力法の動向が設備利用率にも大きな影響を及ぼしていることが他国にないドイツ特有の事情である。

(b) 計画外停止からの再起動事例

2006 年 10 月に起こった BIBLIS-B 号機の事例を示す。

2006 年 10 月 16 日、BIBLIS-B (Siemens 製 PWR、130 万 kW) にて原子炉アンカーボルト<sup>21</sup>取り付け不良が発覚し、同機は停止して補修することとなった。同型炉である BIBLIS-A でも次期定期検査においてアンカーボルト改修が行われることとなった。各作業段階は全て監督官庁と技術評価機関との調整に基づいて実施されただけでなく、本来の改修工事に加えて他メーカーのアンカーボルトについても抽出検査が実施されるという徹底した水平展開が行われた。その結果、A、B 両原子炉においてはアンカーボルト計約 15,000 本が取り付け直された。

2007 年 11 月 30 日、同機の立地するヘッセン州の原子力監督機関は BIBLIS-B の運転再開を許可した<sup>22</sup>。運転再開の条件はアンカーボルト問題に係わる改修工事と全ての検査作業の完了であったが、発電所ではこれらの作業完了後、数日にわたって計測作業と運転再開に向けた準備作業が実施されていた。

以上が公式発表による経緯であるが、同機の停止期間には脱原子力法を考慮した「政治的」な待機時間も含まれていると見られる。IAEA データベースにおける計画停止項目中の“Major back-fitting, refurbishment or upgrading activities with refueling”とされている停止時間の一部がそれに該当する。

このように政治的な理由による意図的な停止延長は公式データではわかりづらく、ドイツの原子力発電所のパフォーマンス評価にあたっては十分に留意する必要があるものの、総停止期間は「政治的」待機時間を含めて 1 年強である。安全基準から考えた事象の重大さからすれば合理的な範囲内であるとも考えられ、1 つの事例として日本でも参考になり得るであろう。

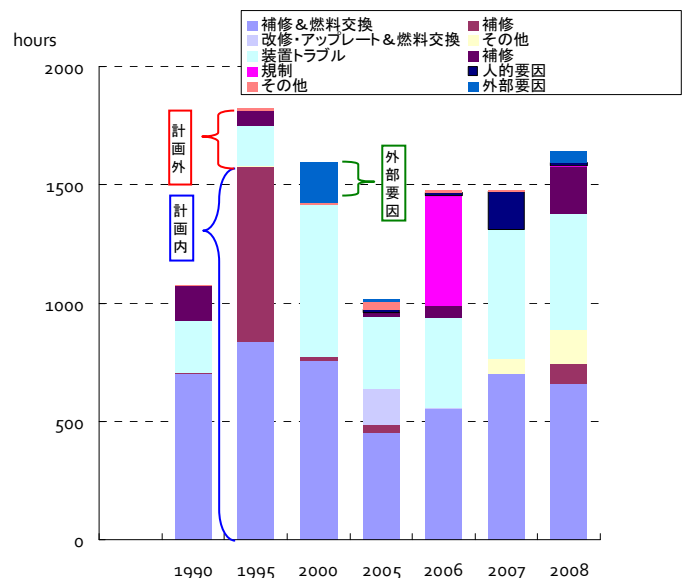
2-2-5 スウェーデン

(a) 原因別停止時間

1995 年の停止時間の長期化はオスカーシャム 1 号機の長期改造工事 (1993 年から 3 年間かけて実施) によるものである。2000 年はリングハルス 1 号機の炉心スプレイ系故障による計画外停止の長期化が影響している。スウェーデンは 10 基 (2005 年以降、1999 年までは 12 基) と基数が少ないため、1 基でも長期停止したプラントがあるとその年の平均停止時間に影響を与えてしまうことを考慮する必要がある。そのような単発的な事象はあったものの、1995 年から 2005 年にかけて計画停止時間は概ね順調に低減している。その短縮要因として電気事業者、安全規制機関、及び補修サービス事業者は、クリティカル工程への 24 時間 3 交代作業の適用を挙げている<sup>23</sup>。

ただし近年、2006 年、2007、2008 年と停止時間は漸増傾向にある。これは、スウェーデンでは 1990 年代から既設炉の出力向上 (uprate) と改善 (upgrade) を行っているが、その出力向上工事後、必ずしも狙い通

図 2-12 原因別停止時間 (スウェーデン)



<sup>21</sup> 原子炉容器を支持する構造物であるペDESTALを、原子炉容器に固定するためのボルト。1 基あたり数千本ある。  
<sup>22</sup> 連邦の安全許可を必要としない。  
<sup>23</sup> スウェーデンだけでなく欧米の多くの国で、定期検査のクリティカル・パスへの 24 時間 3 交代制が適用されている。日本においても一部の電気事業者において適用実績があるが、欧米と比較してその浸透度は低い。

りのパフォーマンスが出せず、各機器の点検などのために断続的に停止したことによるものである。

2007年はフォルスマルク3号、リングハルス3号で設備利用率70%を切り、いずれも機器不具合による計画外停止の長期化が原因であった。2008年は後述する制御棒多数同時破損事象がオスカーシャム3号及びフォルスマルク3号で発見されたことなどが影響している。

このようにスウェーデンでは、計画内停止が概ね短時間で済んでいる一方、計画外停止の長期化が近年頻発しており、計画内停止時間は米国・韓国と大差ないにもかかわらず設備利用率が伸び悩む原因となっている。しかし、それでも次の事例に示すように、計画外停止からの復帰は極めて迅速に行われている事が多い。

(b) 計画外停止からの再起動事例にみる停止期間短縮の取組み

2008年10月に起こったオスカーシャム3号機及びフォルスマルク3号機の事例を示す。

2008年10月5日、計画補修のため停止中だったオスカーシャム3号機において、169本ある制御棒のうち1本の軸にひび割れが発見された。この制御棒は2003年から使用されており、周辺を検査したところ全制御棒の25%ほどに様々な形状のひび割れが発見された。同型のユニットについて水平展開したところ、フォルスマルク3号でも同様の多数のひび割れが発見された。これらのひび割れは冷水と高温冷却材の温度差に由来する熱疲労が原因であると推定された。安全規制機関SSMはこれをCategory 1事象<sup>24</sup>と判断し、直ちにプラント運転事業者に停止を命じ、両機は営業運転を停止した。

SSM、及びオスカーシャム発電所運転事業者であるOKG社、スウェーデンのエンジニアリング企業 Studsvik社はこの熱疲労の原因究明を協力して進めた。一方、SSMは、同機の次回停止予定時期が約7ヶ月後であることを踏まえた上で解析の結果を分析した。その結果、今後7ヶ月の運転期間中に更なるトラブルが生じる可能性は低く、停止予定時期まで運転を継続することに安全上の問題は無いと判断し、12月31日、オスカーシャム3号機が、次いで2009年1月2日、フォルスマルク3号機が再起動した。ただし両機ともオスカーシャム3号機は3月1日まで、フォルスマルク3号機は7月31日まで、それぞれの次回停止時期までの暫定的な再起動許可であり、両機は予定通り2009年の計画停止時期に制御棒の交換に入っている。

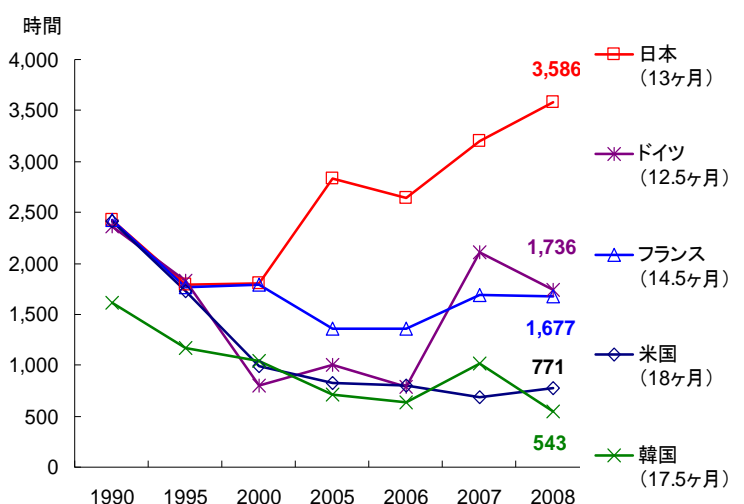
上記の事例は、安全確保のための一時的な対応と、パフォーマンス向上のための長期的な対応とを明確に区別し、安全要件を満たしていれば完全な原因究明を待たなくても運転を許可するという欧州諸国共通に見られるスタンスの典型例である。

2-2-6 各国の事例総括と日本との比較

1990年代では、各国とも概ね2,000時間程度の停止時間であったが、その後は設備利用率の向上の取り組みに伴い、停止時間は短縮傾向にあった。日本のみ、2000年以降停止時間が増加傾向にあり、2008年には図の中で最も停止時間が短い韓国の約7倍にもなる状況にある。日本と比べて運転サイクル期間の近いドイツ、フランスの例を見れば、日本においても、停止時間を現状の半減の1,500時間程度まで短縮することも可能なはずであろう<sup>25</sup>。

上記の通り、主要な原子力先進国は各国とも原子力発電所の設備利用率の向上に努めており、全体として改善傾向にある。直近の2007年、

図 2-13 平均停止時間推移と運転サイクル期間



(出所) IAEA, "Operating Experience with nuclear power stations in member states"各年版より作成  
(注) 凡例の下の数字はおおよそその運転サイクル期間

<sup>24</sup> INES-1に相当。

<sup>25</sup> 日本においても1995年、2000年は現在のドイツ、フランスと同程度のパフォーマンスを示していた。



2008年に関しては、トラブルや法律の影響など各国別に事情を斟酌する必要があるものの、米国の設備利用率の劇的な改善、韓国の極めて高い設備利用率、運転中保全や24時間3交代制など各国が設備利用率改善のために実施してきた各種取り組みには着目すべき点がある。また、フランスやスウェーデンの計画外停止からの再起動事例に関しては、両国ともトラブルが発生した際には速やかに調査を実施し、安全が確認できれば速やかに再起動し、長期的なパフォーマンス向上の取り組みは別途行っている。この迅速な取り組みの底流には「原子力発電所は合理的判断の下で、出来る限り使用すべきである」、という共通した思想があるという点も重要な視点である。

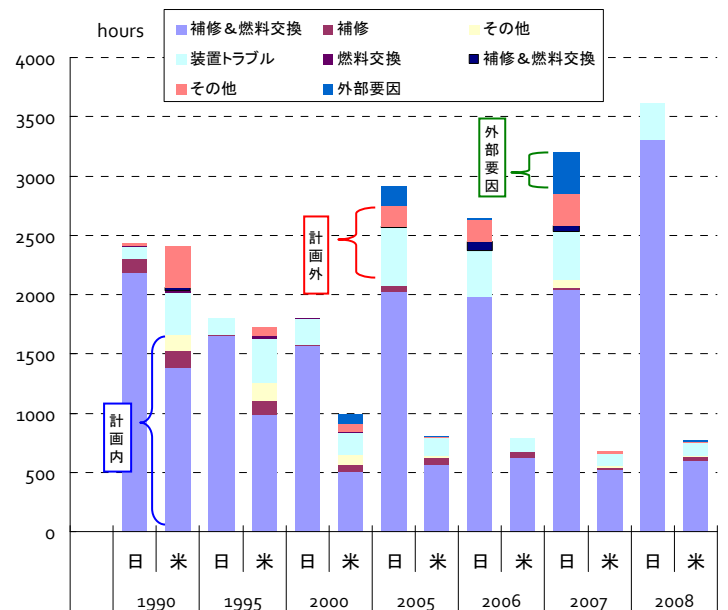
### 2-3 日本の今後の取り組みに対する示唆

本項では、前項まで述べてきた各国における取り組みも踏まえ、日本との差異を抽出し、今後日本としてどのような取り組みが可能かについて述べる。

図 2-14 原因別停止時間の日米比較

#### 2-3-1 原因別停止時間の日米比較

日本の原子力発電所の停止時間を1990年から時系列で見ると、1995年の1,795時間を底として増加傾向にあり、2008年には3,586時間と約2倍に増加している。原因別で見ると、いわゆる計画内の停止であり一般的な定検に相当する補修&燃料交換時間が長くなっている<sup>26</sup>。加えて、計画外である装置トラブルによる停止時間も増加傾向にある。また、2003年10月に検査に関する制度改正が行われた事で結果的に定検期間が伸び、2007年には外部要因として中越沖地震が発生したことによって停止時間が更に長くなり、2008年時点では3,500時間を超える事態となっている。また、これと並行して2006年から耐震新指針への適合性に係る対策の実施が進められたことも、結果的に計画停止期間の長期化の要因になっている。このように現在では停止時間の長期化は常態化しており、早急に要因を明確化し何らかの対策をとることが求められている。



日本と米国との運転パフォーマンス比較を表 2-7 に示す。運転サイクルで約6ヶ月、定期検査の停止日数で約100日、運転中停止日数で約30日の差があり、この結果が約20%の設備利用率の違いとなっている。この表から、米国・日本それぞれの設備利用率は、近似的に以下の式で表せる。

表2-7 日米の原子力発電所のパフォーマンス比較

	評価に用いたデータ	基数	平均運転サイクル期間	運転中停止の回数	運転中停止の頻度(回/年・基)	運転中停止1回あたりの停止日数	平均定検停止日数	設備利用率(%)
日本	各プラントの運転期間とその前後の定期検査期間	53基	約13ヶ月	31	約0.54	約34	約140	約70%
米国		103基	約19ヶ月	188	約1.2	約4.7	約38	約92%

(出所) 総合資源エネルギー調査会 電気事業分科会原子力部会 (第22回) 資料5 (2010年3月5日) より作成

<sup>26</sup> 定検中にトラブルが起きた場合や、定検中に耐震工事を行った場合も補修&燃料交換に分類される例がある。

設備利用率<sup>27</sup> = 運転サイクル期間 / (運転サイクル期間 + 計画外停止日数 + 定検停止日数)

$$\text{(米国)} \quad \frac{570 \text{ 日}}{(570 \text{ 日} + 4.7 \text{ 日} \times 1.2 \text{ 回} + 38 \text{ 日})} = 92.8\%$$

$$\text{(日本)} \quad \frac{390 \text{ 日}}{(390 \text{ 日} + 34 \text{ 日} \times 0.54 \text{ 回} + 140 \text{ 日})} = 71.1\%$$

この 3 項目の差異がそれぞれ設備利用率に与える影響を要因分解してみると、以下の通りとなる。

- 1) 日本が米国並みの定検停止日数 (38 日) を達成できたとする :

$$\frac{390 \text{ 日}}{(390 \text{ 日} + 34 \text{ 日} \times 0.54 \text{ 回} + 38 \text{ 日})} = 87.3\%, \text{ 現状から } 16.3\% \text{ の増加}$$

- 2) 日本が米国並みの運転サイクル期間 (19 ヶ月) を達成できたとする :

$$\frac{570 \text{ 日}}{(570 \text{ 日} + 34 \text{ 日} \times 0.54 \text{ 回} + 140 \text{ 日})} = 78.3\%, \text{ 現状から } 7.1\% \text{ の増加}$$

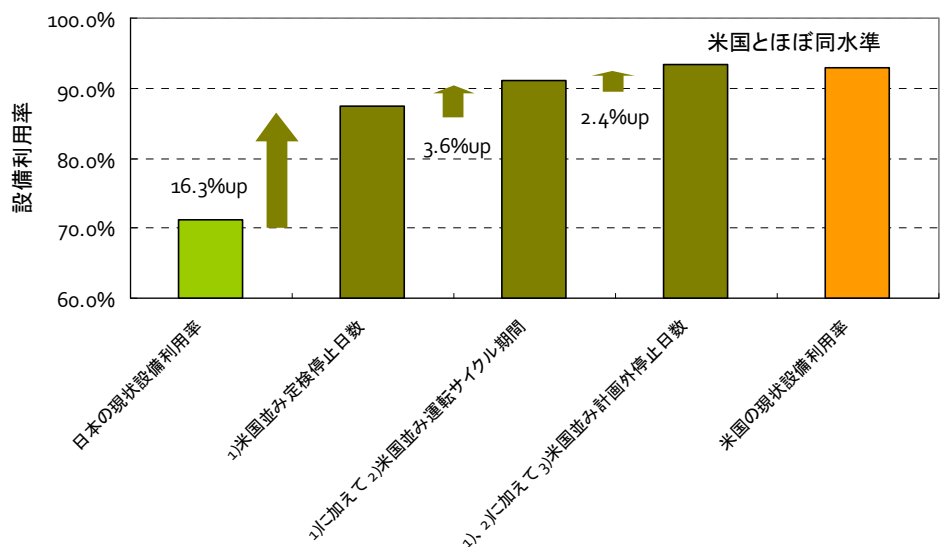
- 3) 日本が米国並みの計画外停止日数 (4.7 日) を達成できたとする :

$$\frac{390 \text{ 日}}{(390 \text{ 日} + 4.7 \text{ 日} \times 0.54 \text{ 回} + 140 \text{ 日})} = 73.2\%, \text{ 現状から } 2.1\% \text{ の増加}$$

すなわち、設備利用率向上に最も大きな効果があるのはこのうち「定検停止日数の短縮」であり、これを達成するだけで 87.3%と、日本のこれまでの最高設備利用率を上回ることとなる。次いで「運転サイクル期間の延長」であり、これを達成するだけで 78.3%となる。また、「計画外停止日数の短縮」により設備利用率は 73.2%に向上する。全てを組み合わせると、日本でも米国並みの設備利用率を達成可能である<sup>28</sup>。以上の要因分析を図 2-15 に示す。

以上をまとめると、我が国の原子力発電所の設備利用率向上には、「定期検査期間の短縮」、「運転サイクルの延長」、「計画外停止期間の短縮」を目標に改善されていくことが望ましい。まずは、近年の低迷から、かつては達成できていた 80%程度までの回復を目指し、その上で、更に高い

図 2-15 設備利用率の試算



<sup>27</sup> この定義は厳密には時間稼働率を示すが、前述の通り、本論では設備利用率の近似値として想定

<sup>28</sup> 日本の計画外停止頻度 (回数/基・年) は米国より少ないので、他の全てのパラメータが米国並みになれば、日本の設備利用率は厳密には米国を若干上回る (93.4%)。

目標を目指して検討していく必要がある。その際には、米国だけでなく高いパフォーマンスを誇っている国々が実施している取り組みからも学べる点を大いに学ぶことで、各種対策を進めていくことが必要である。

以下、項目別に分析とインプリケーションを述べる。

### 2-3-2 定期検査期間の短縮

我が国の定期検査期間の長期化に関しては図 2-2 で示した通り、運転年数が長いことによる高経年化の問題や、炉型が違う事に拠る有利不利が致命的な要因であるとは考えにくい。

ただちに着手可能な有効な策としては、各定検工程の短縮のための運転中予防保全活動（PMO）の検討や、安全性を損なわない範囲で安全系機器を待機除外にすることが許される時間（AOT）の緩和等の活用・浸透が期待される。現在我が国においても、米国などの取り組みを参考にして運転中保全や AOT の適応拡大に関して議論が交わされているところである。原子力安全・保安部会基本政策小委員会では、安全規制を取り巻く環境が近年変化してきたことを踏まえ、今後取り組むべき課題を整理し、平成 22 年 2 月に報告書を取りまとめている<sup>29</sup>。同報告書では、安全規制における新たな経験と知見の活用（リスク情報の活用方策の検討等）、運転中保全、運転期間延長に係る安全評価、原子炉出力向上等に係る経済的・国際的な状況変化も踏まえ、立地自治体・住民や産業界を含む様々なステークホルダーとのコミュニケーションの一層の充実と信頼関係の醸成が挙げられている。また、運転中保全に関しても保安部会・原子炉安全小委員会運転管理 WG で、運転中保全の実施にあたり原子炉施設の安全性、規制の関与などについて検討が重ねられている。

これら各種新制度の導入効果や、各国との比較などをより容易にするためにも、定期検査の作業項目ベースで日本と他国との工程表とつき合わせ、違いを分析していくことは有用である。各事業者ベースでは発電所毎に策定される事業計画において、既にこのような分析を行っているとも考えられるが、現状ではこれらの情報は公開情報ではなく電気事業者の機密情報であり、慎重な取り扱いが必要であるといわざるを得ない。とはいえ、国際展開などを視野に入れば、設備利用率向上は国を挙げて解決すべき課題であり、テンプレートの共有出来る部分は共有し、国レベルで比較が容易である方が望ましい。そして将来的には、主要な定検作業工程に関しては、共通のテンプレートに沿って厳密に作業時間を報告、比較できるようになることが望ましい。

更に、テンプレートに沿ってリスク情報を整理することで、リスク情報を網羅的に収集するだけでなく、水平展開が可能なところは水平展開を行うことで、情報を有効に活用できることも期待される。既に導入されている米国を筆頭に、世界各国で検討されているリスク情報を活用した分析手法の導入に関しては、適切に規制が見直され効率的に運用される事が望まれる。

定期検査の短縮に関しては米国・韓国を始め、高い実績を残している国があり、それらの国では着々とノウハウを蓄積している。欧米諸国で広く浸透している定期検査における 24 時間 3 交代制が日本でも一部に適用され、問題なく遂行されていることからしても、技術水準において日本が劣っているとは考えられず、これらの国が達成している定期検査期間の短縮、高い設備利用率も不可能ではない。一方で、米国と比較すれば日本国内で実施されているような数カ月を要する長期保全の大型工事があまり見られない。作業の効率化とあわせて、どのような作業を行っているのかといった点を詰める事も今後の課題であろう。

各種対策の実施にあたっては、日本国内のリスク情報及び運転員・作業員の経験の蓄積を進めると共に安全性に十分配慮しつつ、必要なところは規制の緩和を進める作業が必要になる。一方で、制度の改正に当たっては多くの手続きが必要になることも考えられるため、各種準備に時間を取られるようなことでは本末転倒になりかねない。この点でも各国の事例や情報を上手く活用することで、効率的に進めていくとともに技術的な分析はもとより、国民、地域住民の理解を得ることを進めていくことも重要であると考えられる。

### 2-3-3 計画外停止期間の短縮

我が国の原子力発電所の計画外停止頻度は、高い技術力と安全性を背景に、米国など他の国よりも相対的に低

<sup>29</sup> 原子力安全・保安部会基本政策小委員会、「原子力安全規制に関する課題の整理」、平成 22 年 2 月

い頻度で推移している。一方で、停止してから復帰にかかるまでの時間は米国の数倍とも試算されている。米国や韓国で問題なく運転しているところを見れば、計画外停止からの早期復帰も技術的に不可能ではないと推測される。特に、安全性に問題ない事を確認後、まず発電所を立ち上げて、その後再発防止のために原因を詳細に究明していくという姿勢は米国、韓国、フランスにとどまらず、他の原子力導入国においても概ね共通している思想であり、この点は日本の思想と大きく異なっている。これらを踏まえて、まずは技術的な部分での作業時間を他の原子力先進国と比較する事で、技術的作業の効率化を進めていくことが重要である。その上で、技術的な作業以外の作業に掛かる時間、問題点を分析していくことが必要になる。

#### 2-3-4 運転サイクル期間の延長

我が国の原子力発電所の運転サイクル期間は、現状では米国や韓国に比べて短い。これに関しては、2010年4月から規制上は最長で24ヶ月までの運転が可能となっており、これが適用される範囲が拡大していくことが期待される。適用範囲の拡大に関しては、共通する機器の情報や長期間運転に伴う燃料特性の変化など、他の発電所の情報を活用することで、より円滑に長期間運転にシフトしていくことが期待される。

また、定検までの1サイクル期間の検討と共に、長期計画として数サイクルを含めたより長期の運転サイクルを考えることも必要である。日本においても各事業者で検討されている要素ではあるが、改めて韓国の事例を範とし、10年もしくは数サイクルと言った単位で事前に計画を練っておくことで、作業の準備、来るべき高経年化対策を事前に織り込み、最適化された運転計画とすること、更に、フィンランドやスウェーデン等の取組みを参考に国全体の運転サイクル、保全計画をマネジメントしていくことで、技術者や作業員のマンパワーの配分を国全体で把握し、限られた人的資源の最適配分を図ることも重要であろう。一方で、特に日本では、突発的に発生した他の発電所のトラブルに関して、水平展開が厳密に求められる例もあるため、長期計画に関しては他国を範としつつも国情に合わせて柔軟性を持った計画であることも検討すべきである。高経年化等に伴って、益々熟練技術者が必要になる場面も増えることが想像されるため、長期間・複数プラントを総括した全体最適化を目指すことも、54基を有する日本の原子力産業界における重要な論点であると考えられる。

「定検の短縮」、「計画外停止期間の短縮」、「運転サイクル期間の延長」、それぞれの各対策の中には、我が国において技術的には現状すぐにも実施可能である対策は多くあり、これらの対策を迅速かつ着実に実施していく事が最優先である。一方で、原子力発電の大きな特徴として、他電源以上に文化的・社会的背景等、技術だけでは解決できない課題も多く存在している。これらを解決していくためには、問題点を明確にし、地域住民、国民、事業者、中央省庁が足並みを揃えて取り組んで行く事が必要であり、相互理解の促進が我が国原子力発電所の効率的な運用につながっていくことが期待される。

### 3. まとめ

我が国の原子力発電所の設備利用率は、1990年代においては欧米諸国とほぼ同程度であったが、近年は大きく水をあけられる事となっている。安全確保と効率的な運転のために関係者各位が継続的に努力を続けているにも関わらず最終的な成果に結びついていないことは、残念な結果であるといわざるを得ない。一方で、米国や韓国を始めとした諸外国が様々な取組みを実施し、その結果として着実に設備利用率を向上させていることも事実である。これらの諸外国の取組みを参考に、我が国としての取組みを検討・推進する必要がある。具体的には、「定期検査期間の短縮」、「計画外停止期間の短縮」、「運転サイクル期間の延長」の三点を中心とした対策を更に推し進め、着実に実施して行く事が期待される。

本稿でレビュー・分析してきた結果から言えることは、まず設備利用率低迷の技術的要因を明確化し、十分な検討を行い、可能なものから段階的に取組みを実施していくことが最優先であろうということである。それを踏まえて、事業者、規制当局間で詳細な議論を進めて行かなければならない。具体的には、事業者間においては2-3-2で述べたような共通テンプレートを活用することで、定検工程の各作業時間を更に詳細に詰めていくこと

が必要になり、規制当局は安全性を確保した上で不要・過剰な規制を撤廃、緩和する事が必要になる。

今回の分析にあたり、各国関係者に話を聞く機会があったが、どの国においても底流には「原子力発電所は合理的判断の下で、出来る限り使用すべきである」という考え方があることがわかった。原子力発電所は、単に潜在的危険性を内包した施設ではなく、社会にとって有益なインフラであるという観点に立てば、至極当然の意見であり、我が国においても再認識すべきことではないだろうか。また、原子力の安全・安心そのものに対する考え方や、安全規制を担う中央政府に対する考え方に関しても、日本とは大きな違いがある。その意味で、原子力は純粋に技術的なものであり、多分に社会的なものとも言える。

最後に、国と地方政府に期待される役割について付記する。

国は事業者が上記の作業を進めるにあたって、積極的にイニシアティブをとり、矢面に立って国民理解を進めるとともに、規制に関する事項に関しては最終的な責任を担うことが期待される。そして、地方政府は地域住民の十分な理解の促進とコミュニケーションの橋渡し役になることが期待される。関係者が着実に各種取り組みを実施し、既存炉の設備利用率を向上させていくためには、原子力賛成・反対の議論や行政不信、安全性に対する過度な不安を克服し、今ある物をどう活用するかという視点が必要であり、十分な国民理解が必要になる。それがなければ、既存の取り組みの実施ですら何らかの障害に直面し、事業が遅延する状況も起こりうると思われる。その結果として、現状で技術的に可能であると期待されるレベルにすら到達しない可能性がありうる事は、十分に留意すべきである。

お問合せ：report@tky.iecej.or.jp