

燃料の健全性確保のためのならし運転法 “PCIOMR”の改良

Improvement of Recommendation for Preconditioning Procedures for BWR Fuel

日立製作所は、沸騰水型原子炉の信頼性確保の一環として、燃料のペレットと被覆管の相互作用による燃料漏れ防止策として、PCIOMR(一種のならし運転)を提案し、顧客の原子炉運転法に反映してもらっている。しかし一方では、これが原子炉運転の自由度を制約し、稼働率に影響するため、PCIOMRの可能な限りの緩和が要求されている。

日立製作所では、PCIMORの緩和施策の一つとして、出力上昇速度の制限値の改善を目指して、商用炉燃料出力履歴統計解析評価システムを開発し、国内外の沸騰水型原子炉の運転実績データを分析し、燃料の出力上昇速度と燃料被覆管の欠損発生との相関関係の検討を行なった。その結果、出力上昇速度の制限値を従来の毎時0.06kW/ftから毎時0.10kW/ftまで上昇できることを評価検討した。本稿では、運転実績データの手順と結果について紹介する。

河原 暲* Akira Kawahara

安田哲郎* Tetsuo Yasuda

平沼博志** Hiroshi Hiranuma

坂上正治*** Masaharu Sakagami

1 緒 言

BWR(沸騰水型原子炉)では、二酸化ウラン焼結ペレットを、外径約12.5mm、長さ約4,000mmのジルカロイ-2被覆管に密封した燃料棒が用いられている。電気出力1,100MWeのBWRの場合、炉心は約5万本の燃料棒から構成される。商用BWR

表1 燃料仕様比較表 中国電力株式会社島根原子力発電所には、初装荷燃料として7×7型、第1回、第2回取替燃料として7×7改良型、第3回取替燃料以降は8×8型燃料が装荷されている。また、東京電力株式会社福島第一原子力発電所4号機には、初装荷燃料として7×7改良型、第1回取替燃料は8×8型燃料が装荷されている。

燃料の型式・単位			7×7型	7×7改良型	8×8型
項目					
ペ レ ッ ト	材料	—	UO ₂	UO ₂ 及びGd ₂ O ₃ 添加UO ₂	UO ₂ 及びGd ₂ O ₃ 添加UO ₂
	直径	mm	12.4	12.1	10.6
	長さ	mm	22	12	11
	密度 (対理論密度比)	%	94	95	95
被 覆 管	材料	—	ジルカロイ-2応力除去焼鈍材	ジルカロイ-2再結晶化焼鈍材	ジルカロイ-2再結晶化焼鈍材
	外径	mm	14.5	14.3	12.5
	厚さ	mm	0.90	0.94	0.86
燃料集合体全長		m	4.35	4.35	4.35
燃料有効高さ		m	3.66	3.66	3.66
燃料集合体当たりの燃料棒本数		—	49	49	63
水分ゲッタの有無		—	なし	あり	あり
ウォータロッドの有無		—	なし	なし	あり
使用 条件	最大線出力密度	kW/ft	17.5	17.5*	13.4
	炉心圧力	kg/cm ²	71.7	71.7	71.7

注：*BWR-4以降は18.5kW/ft

燃料の仕様は、燃料集合体の構成に関して、7×7型、7×7改良型、8×8型へと変遷しており、その主要仕様を表1に示す。

現行設計燃料では、その寿命期間を通じてほとんど燃料被覆管からの放射能漏れは発生していない。しかし、極めて低い頻度ではあるが、急激な出力上昇に伴うPCI(Pellet-Clad Interaction：ペレットと被覆管との相互作用)に起因して漏れの生ずる可能性がある。PCIによる燃料漏れを防止し、その絶無を期すためには、ペレットと被覆管とをなじませるため、原子炉出力を徐々に上昇させることが効果的であり、軽水炉の運転ではこの観点からのルールが設けられているのが普通である。この燃料のための「ならし運転」のことをPCIOMR(Pre-Conditioning Interim Operating Management Recommendation)と称している。PCIOMRは昭和48年度ごろから国内でも適用され始め、その有効性が十分立証されている。

一方、PCIOMRの適用は、特に原子炉の出力上昇時に種々のルールを設けるため、プラント利用率の低下などを招いている。そこで、耐PCI特性を考慮した燃料改良の効果を反映し、プラント利用率の向上を目標として、従来のPCIOMRの見直しを行ない、燃料の健全性を確保できる範囲内で、PCIOMRをどこまで緩和できるかを評価した。本稿では、7×7型燃料に比べPCI特性上の設計改善を施した7×7改良型、及び8×8型燃料を対象とし、PCIOMR緩和のための検討の手順及びその結果について紹介する。

2 PCIOMRの概要及び改良の経緯

2.1 PCIOMRの概要

PCIOMRに基づいて原子炉出力を上昇させる際の運転法の要点は、以下に述べるとおりである(図1参照)。制御棒操作による出力上昇が許容される線出力密度、すなわち制御棒操作しきい値^{*1)}までは、制御棒操作により自由に出力上昇させ

* 日立製作所日立工場

** 日立製作所電力事業本部 工学博士

*** 日立製作所エネルギー研究所 理学博士

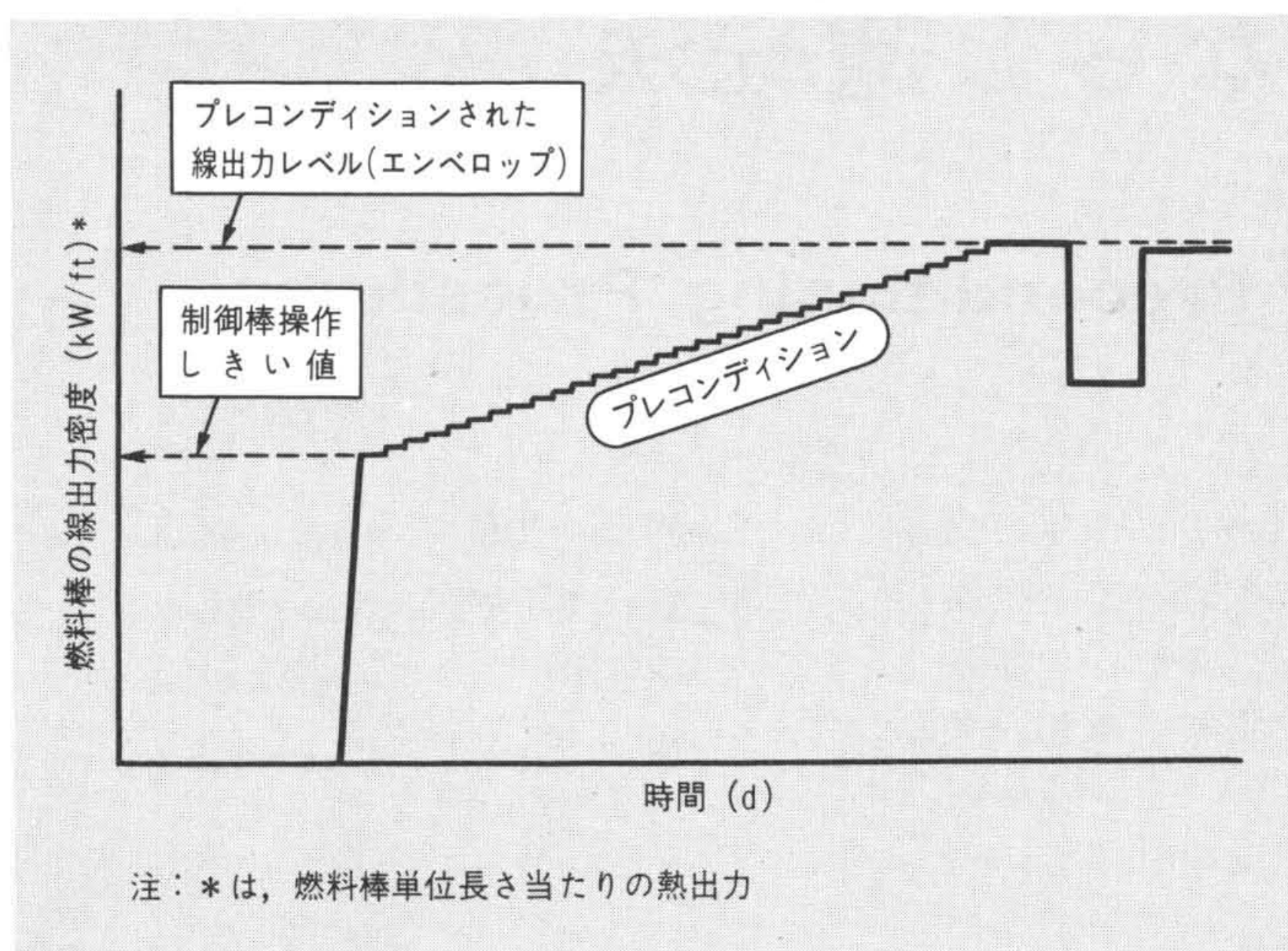


図1 PCIOMRの概要 制御棒操作しきい値以上に出力を上昇させる場合には、ペレットと被覆管とを十分になじませるために、流量制御により緩やかに出力を上昇させる。この緩やかな出力上昇(プレコンディショニングという。)の後、その出力レベルまでは、自由に出力変動を行なうことができる。

ることができる。しきい値以上に出力を上昇させる場合には、ペレット変形と被覆管とを十分になじませるために、流量制御により緩やかに出力を上昇させ、かつ一定期間出力をホールドさせる。このような出力上昇のことをプレコンディショニングと言い、そのときの出力上昇こう配の上限値をプレコンディショニング速度と呼んでいる。いったんプレコンディショニングされると、その出力レベル(これをエンベロップと呼ぶ。)までは、自由に出力変動を行なうことが可能になる。

2.2 PCIOMR改良の経緯

GE社(米国・ゼネラル エレクトリック社)は、昭和48年にPCIOMRを導入して以来、昭和50年には低燃焼度燃料に対する制御棒操作しきい値を上昇するなどの改良を行ない、運転上のルールを一部緩和した。その後、実験炉での新たな出力急昇試験の結果に基づき、プレコンディショニング速度を見直している。

日立製作所でも、7×7型燃料に対するPCIOMRを昭和48年に提案し、更に設計改善の施された7×7改良型燃料に対するPCIOMRを昭和52年に提案し、顧客の理解を得て、商用炉に適用してもらっている。その後、継続してPCIOMR緩和のために、出力急上昇による燃料損傷試験などを実施するとともに、海外及び国内商用炉の運転データから燃料棒の出力履歴を解析し、プラント利用率の向上に密接なプレコンディショニング速度などの緩和の可能性について、独自に検討を行ってきた。

3 PCIOMR緩和のための検討手法

PCIによる燃料被覆管からの放射能漏れは、燃料棒の出力が上昇する際に、PCIにより燃料被覆管に生ずる局所的な応力又はひずみと、燃料ペレットから放出されるFPガス(核分裂生成ガス)の重量下で発生することが明確になりつつあり、その定量化のための研究が、各国で実施されている。日立製作所でもその解明を続けており、遠からず定量化に成功するものと考えている。

本検討では、このような状況にかんがみ、プレコンディショニング速度を検討したものである。以下にその手順について説明する。

3.1 運転実績の活用

7×7型、7×7改良型及び8×8型各燃料について、それぞれの国内外での運転実績を評価し、燃料漏れが生じないことが実績により確認されている範囲内で、PCIOMRを緩和することを原則とした。

日立製作所では自社研究所を中心として、商用炉でのプロセス計算機の記録から、装荷されている燃料棒の任意の位置の局所線出力密度の時間的変化をオフラインで計算するシステム、及びこの算出されたデータベースを用いて、PCIOMRで重要と考えられる燃料棒の出力上昇速度、出力変化幅などの特徴値を、統計的に評価できる解析システムを開発した。この商用炉燃料棒の出力履歴統計解析評価システムの概要を図2に示す。

本検討では、国内外のBWRプラントを対象としてこのシステムを活用し、燃料の健全性が実証されている範囲を求めた。

3.2 原子炉出力上昇時における出力上昇速度分布の検討

原子炉出力上昇時の運転計画を立てる際には、あらかじめオフライン計算により、燃料棒の出力上昇速度の最大値がプレコンディショニング速度を超えないように電気出力の上昇率を設定している。したがって、運転計画時のプレコンディショニング速度と実際の出力上昇速度の炉心全体の分布の関係を、オンライン計算機による運転データに基づいて評価する必要がある。次章にその対策について述べる。

4 プレコンディショニング速度の検討

4.1 検討に用いたデータ

プレコンディショニング速度の検討に用いたデータは、次の試験及び実績に基づいている。

(1) 実験炉での出力急昇による燃料損傷試験

燃料棒の出力上昇速度が大きくなるほど、PCIに起因して燃料が損傷し、漏れに至る可能性が増大する。この出力上昇速度と燃料損傷との相関を定量的に把握するため、あらか

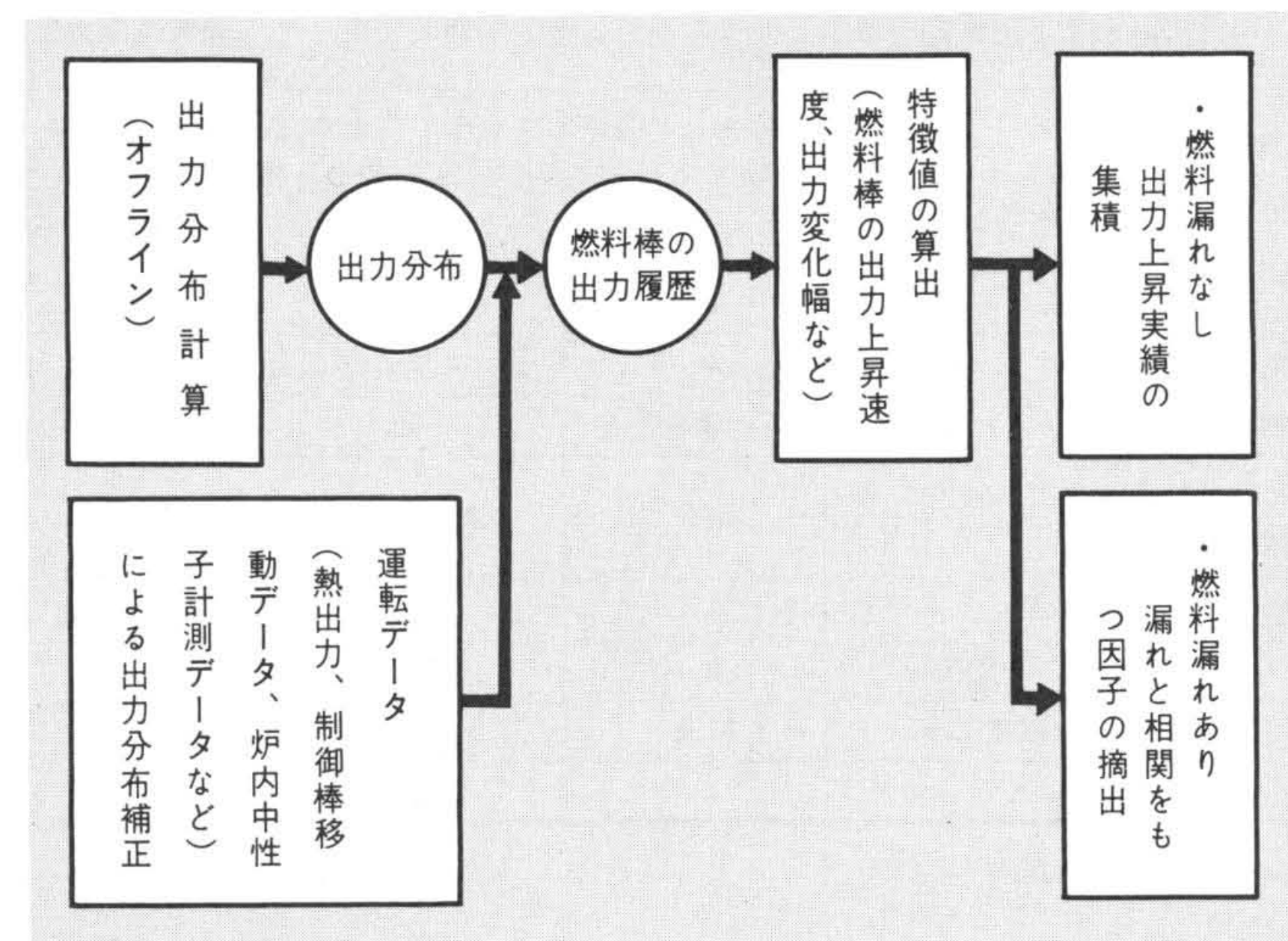


図2 商用炉燃料棒出力履歴統計解析評価システムの概要 商用炉に装荷されている燃料棒の線出力密度の時間的変化を再現し、PCIOMR上重要な燃料棒の出力上昇速度などの特徴値を統計評価することができる。

※1) 通常は8 kW/ft、ただし、低燃焼度では11kW/ft

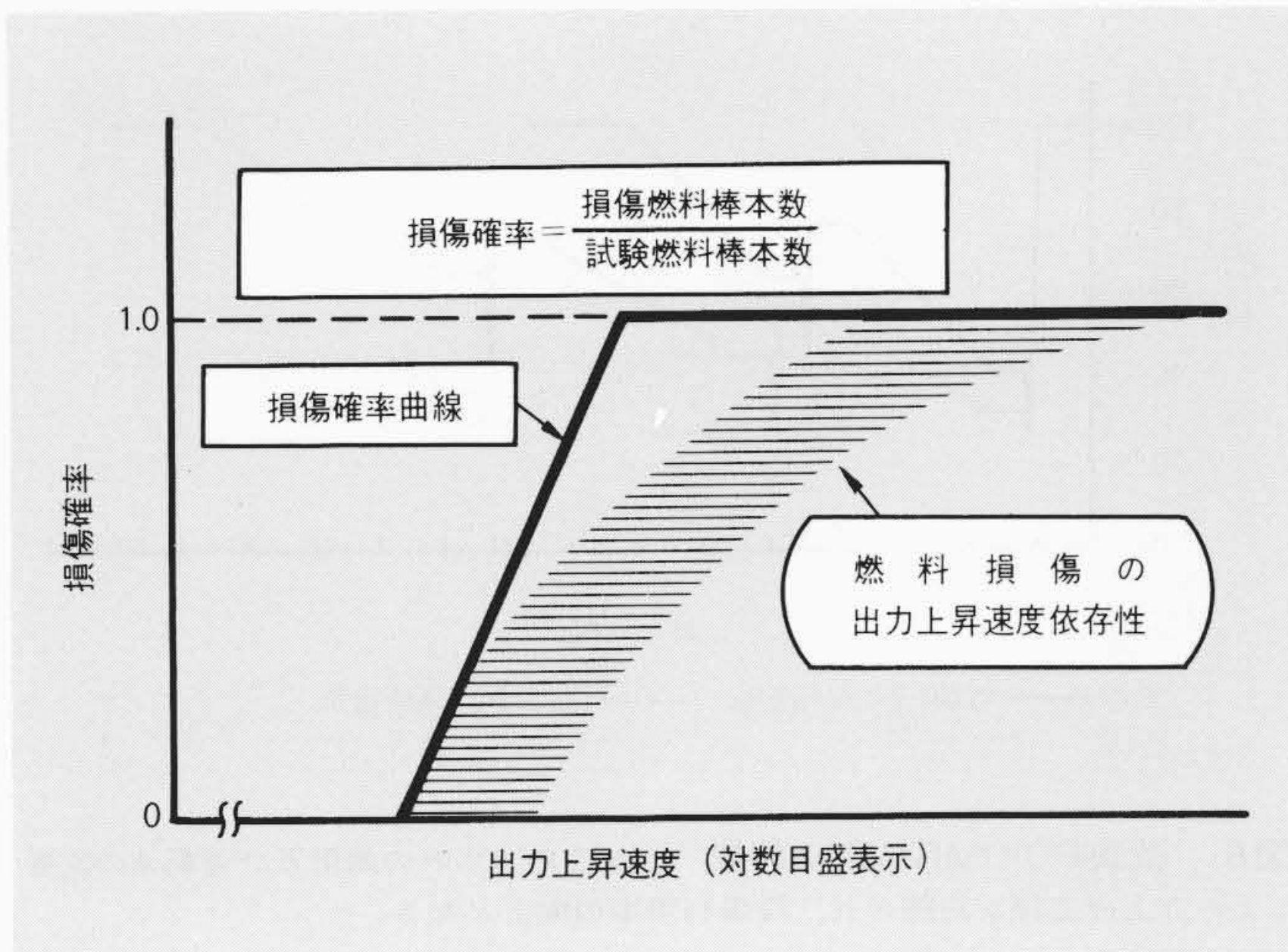


図3 出力上昇速度と燃料損傷確率の関係 実験炉での出力急昇による燃料損傷試験結果から、高燃焼度での出力上昇速度と損傷確率の相関を得た。

じめ商用炉で長期間燃焼させた約20本の燃料棒を実験炉に装荷し出力上昇速度を、パラメータとした試験を^{※2)}実施した。試験の結果を検討すると、出力上昇速度の増加に伴って燃料損傷の生ずる確率が増加することを明瞭に示しており、これに基づいて、図3に示す出力上昇速度と損傷確率の関係を設

定した。なお、この試験に用いられた燃料棒の仕様は、表1に示す現行燃料仕様と比べて、PCI特性上損傷しやすい仕様であるが、保守的に現行仕様と同等であると仮定した。

(2) 商用炉での健全燃料棒の出力上昇速度の実績

商用炉での燃料の出力上昇速度は、最近ではすべてPCIOMRが適用されているため、通常プレコンディショニング速度以下の低い値を示している。しかし、PCIOMR適用の初期、あるいは海外の商用炉の実績を調査した結果、従来のPCIOMRで規定されたプレコンディショニング速度を上回る出力上昇速度を経験し、かつ健全な燃料が多数存在することが判明した。

日立製作所では、米国商用炉及び国内商用炉^{※3)}の運転データを用いて、商用炉燃料棒出力履歴統計解析評価システムにより、燃料棒単位での出力上昇速度の実績を解析評価した。この結果、7×7改良型及び8×8型燃料に関して、従来のPCIOMRのプレコンディショニング速度を上回る経験を得たにもかかわらず、燃料が健全であった線出力密度及び燃焼度の範囲が明確になった。

4.2 プレコンディショニング速度の検討

出力上昇時に炉心の燃料棒に損傷の生ずる確率を評価するに当たって、前述の実験炉での燃料損傷試験により得られた出力上昇速度と燃料損傷確率の関係を、商用炉で健全燃料が実際に経験した出力上昇速度の実績値で修正した、その方法を模式的に図4に示す。これは、実験炉で得られたデータの保守性を商用炉実績のある範囲に切り詰めることを意味している。

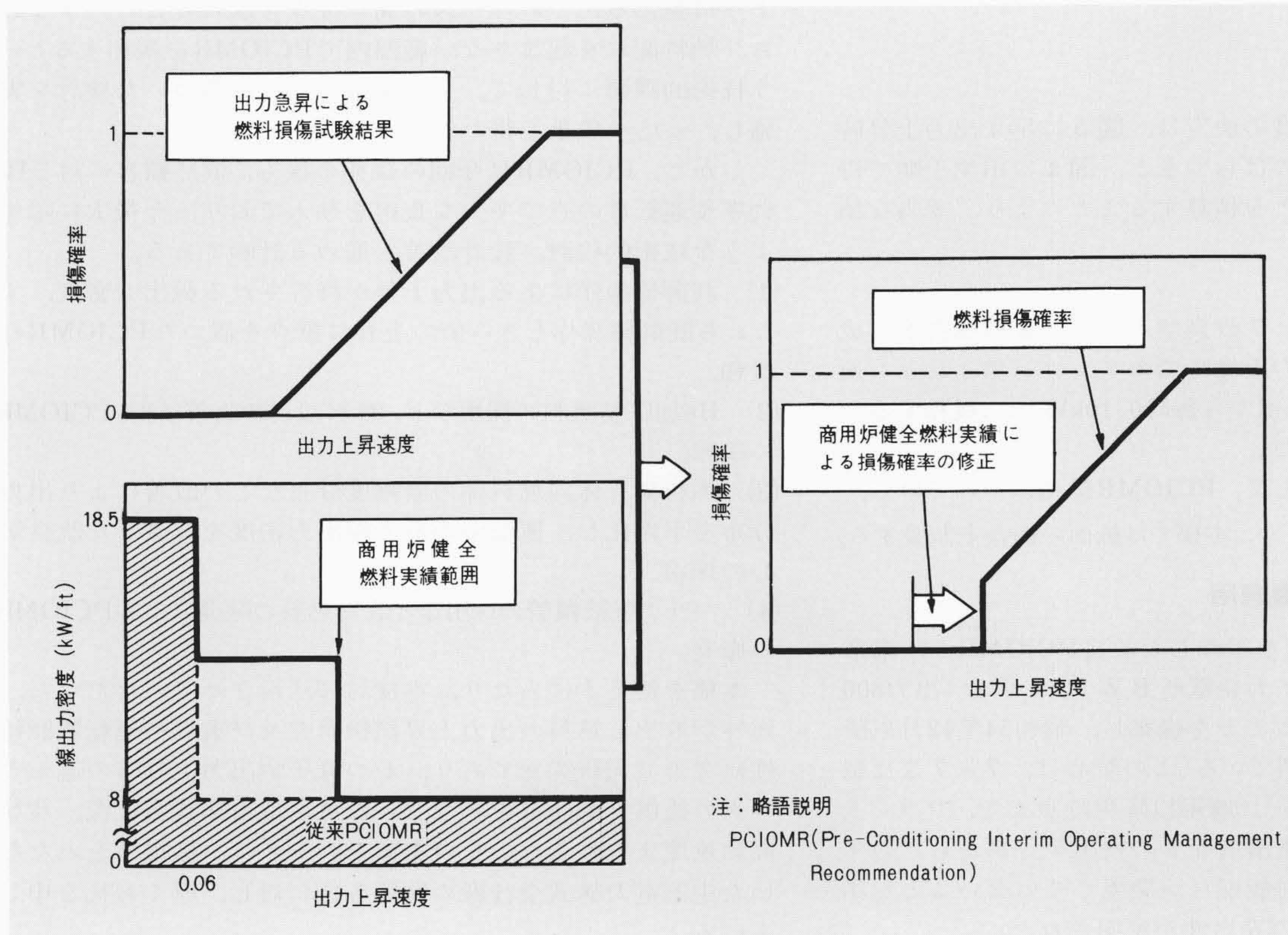


図4 燃料棒の損傷確率推定手法の概要 燃料の損傷確率は、出力急昇による燃料損傷試験結果を、商用炉での健全燃料の出力上昇速度の実績値で修正することにより求めた。

※2) 東京電力株式会社、株式会社日立製作所、東京芝浦電気株式会社及びスウェーデンのASEA-ATOM社との共同研究として実施された。

※3) 東京電力株式会社と株式会社日立製作所の共同研究として実施された。

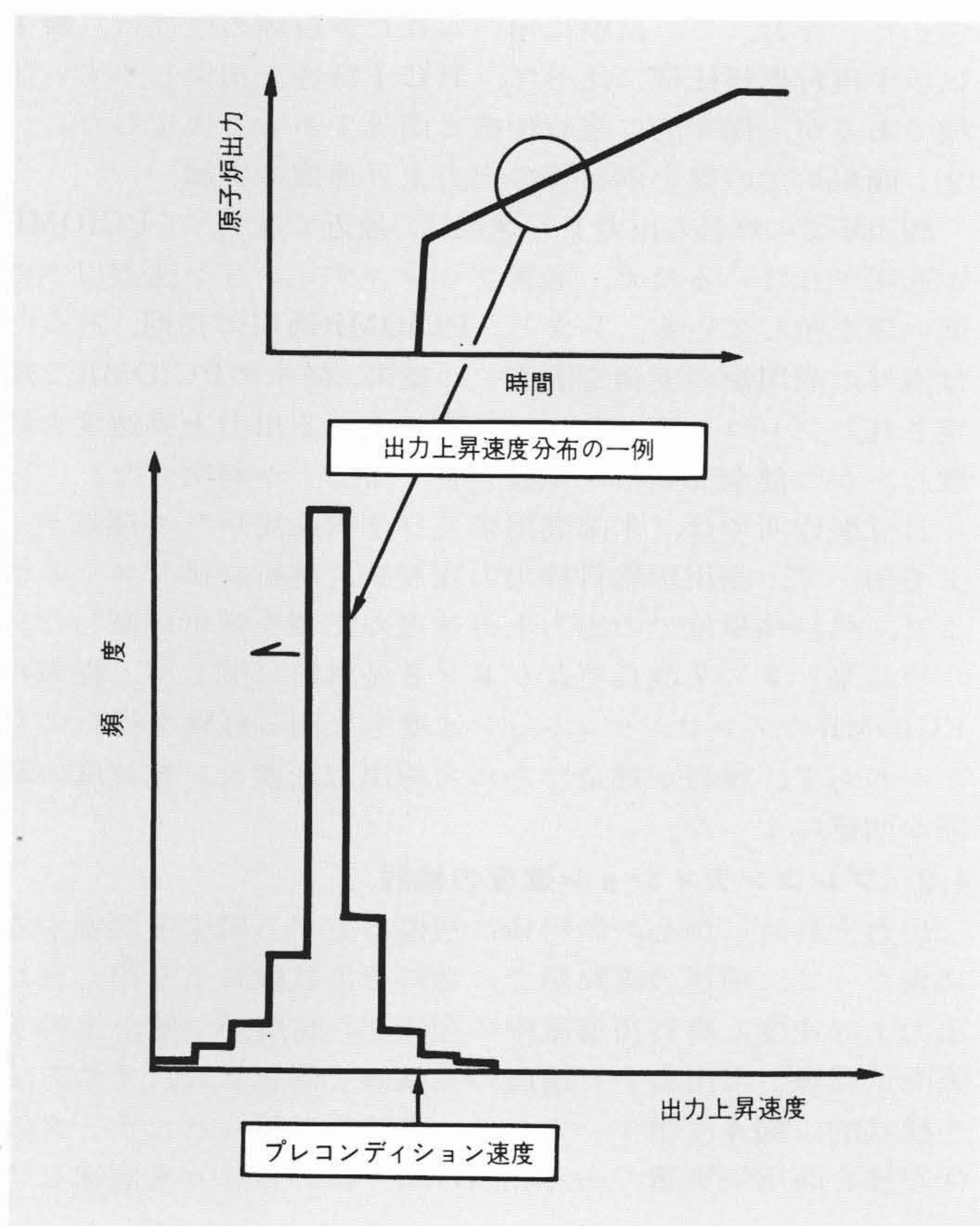


図5 出力上昇速度分布の例 出力上昇中に、プレコンディショニング速度を超える燃料が一部存在することが分かる。

プレコンディショニング速度の決定は、図5に示す出力上昇時の燃料棒の出力上昇速度のばらつきと、図4に示す手順で得られる燃料棒の損傷確率とを積算することにより、妥当な値を選定する手法によった。

4.3 得られた結果

前述の手法により、7×7改良型及び8×8型燃料から成る炉心に対し、原子炉出力上昇時でのプレコンディショニング速度を、従来の毎時0.06kW/ftから毎時0.10kW/ftに緩和することができるとの結論を得た。

その他、本検討に付随して、PCIOMR緩和についての二、三の補足的結論を得ているが、本稿では紙面の都合上割愛する。

5 改良PCIOMRの実機適用

プレコンディショニング速度を緩和した改良PCIOMRを、東京電力株式会社福島第一原子力発電所BWR-4炉心(出力800MWe級)の運転に適用することを提案し、昭和54年12月以降の運転起動時以降採用を得ている(この炉心は、7×7改良型及び8×8型燃料から成る)。適用以降現時点まで、プラントオフガス放出率、炉水沃素濃度などの検出データから、いずれも燃料被覆管からの放射能漏れが発生していないことを示しており、改良PCIOMRの妥当性が証明された。

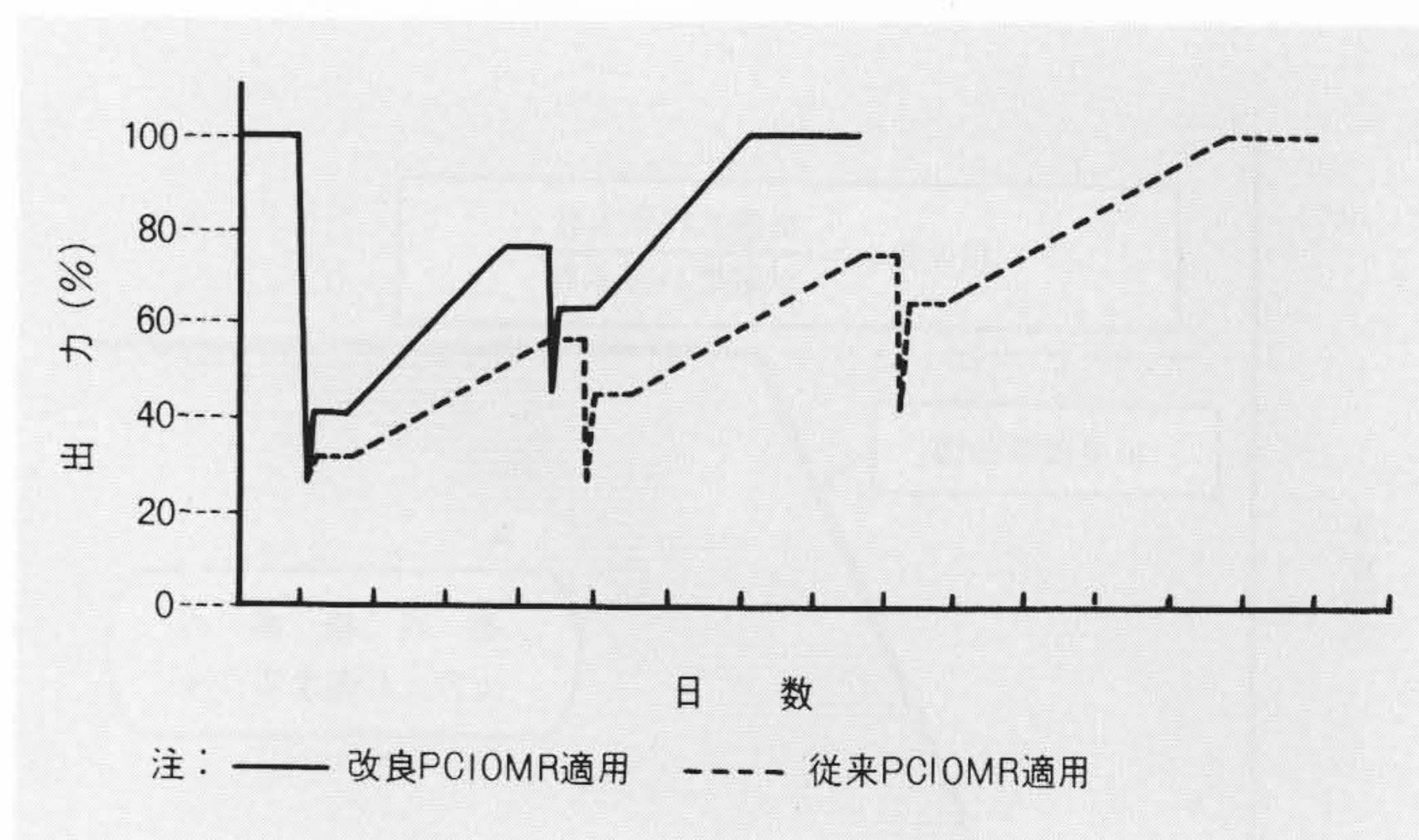


図6 改良PCIOMRによる効果 改良PCIOMRの適用及び運転法の改善により立上げ工程が短縮され、設備利用率の向上となる。

この改良PCIOMRによる設備利用率向上への寄与は、年一度の冷態起動、年4回の制御棒パターン交換などの標準運転パターンを想定した場合、約2%に達するものと期待される。改良PCIOMRを適用した場合の出力曲線の一部を、従来のPCIOMRを適用した場合と比較して図6に示す。

6 結 言

BWRの設備利用率向上という観点から、PCIOMRの緩和は重要なファクターの一つであるが、同時に定期検査期間短縮、放射線被曝線量の低減という点からは、燃料の健全性の確保を最優先しなければならない。これら一見両立しにくいように見える二つのニーズの間に接点を求めること、すなわち、燃料漏れを起こさない範囲内でPCIOMRを緩和するという技術的課題に対して、主に実績データに基づいた検討を実施し、一応の成果を得た。

しかし、PCIOMRは今回の緩和の後も、依然顧客に対し稼働率や運転性の点で多大な負担を与えており、今後次に示すような技術的検討、設計改善を進める計画である。

- (1) 制御棒操作による出力上昇が許容される線出力密度、すなわち制御棒操作しきい値の上昇に重点を置いたPCIOMRの緩和。
- (2) He加圧型燃料の採用など、燃料設計の改善によるPCIOMRの緩和。
- (3) 燃料集合体内燃料棒の濃縮度分布などの改善により出力分布を平坦化し、運転中の最大線出力密度を低減した改良炉心の採用。
- (4) バリア型被覆管の採用など改良燃料の開発によるPCIOMRの撤廃。

本稿を終えるに当たり、本検討に活用させていただいた、海外炉取出し燃料の出力上昇試験研究及び実燃料運転履歴特性研究の共同研究元であり、かつ原子炉出力上昇時の運転データの提供と御助言をいただいた東京電力株式会社殿、及び高燃焼度までの漏れのない実績をベースに、御指導をいただいた中国電力株式会社殿の関係各位に対し、厚くお礼を申し上げます。