

放射線量の低減対策 — 現状と展望 —

Improvement in Radiation Exposure Reduction Technology at BWR Plants — Present Status and Prospect —

原子力発電プラントでは、稼働基数の増加に伴いその保守点検作業を円滑に実施する上で、放射線量の低減がますます重要となってきた。日立製作所では、放射線量を低下させるため低線量プラントの設計技術確立し新規プラントへの適用を図ってきた。

本稿では、東京電力株式会社福島第二原子力発電所2号機での運転経験をもとに開発したFe/Ni比制御、プレフィルミングなどの放射能低減技術の同社福島第二原子力発電所4号機への適用状況と効果について紹介する。

大角克己* *Katsumi Ôsumi*
鶴岡良造** *Ryôzô Tsuruoka*
会沢元浩** *Motohiro Aizawa*
治部 襄* *Noboru Jibu*

1 緒 言

原子力発電所の運転保守作業の効率向上に、発電所での作業従事者の受ける放射線量の低減は重要な課題の一つである。また、これは通商産業省改良標準化でも取り上げられ、新設プラントに全面的に適用され成果を挙げつつある。

日立製作所では、改良標準化のベースプラントである東京電力株式会社福島第二原子力発電所2号機(以下、福島第二・2号機と称する。)の運転実績をもとに開発した放射線量の低減対策を実施してきた。

従事者が受ける放射線量は、作業場所の線量率と従事時間の積である。したがって、プラント放射能低減による作業環境の線量率低減は、作業の効率向上にとって最も効果的な方法である。東京電力株式会社福島第二原子力発電所4号機(以下、福島第二・4号機と称する。)は、昭和62年8月の営業運転に先立つ出力試験開始時から種々の線量率低減対策が実施され、原子炉水放射能濃度が先行機に比較して低濃度に維持されている。本稿では、これらの放射線量の低減対策の現状について述べる。

2 プラント放射能低減による線量率低減

原子炉内で発生した放射能は、原子炉水に含まれて原子炉一次系を循環し、その機器・配管内表面に付着蓄積し、作業場所の線量率を支配する。したがって、プラント放射能低減による線量率低減には、(1)原子炉水中の放射能濃度低減と、(2)機器・配管への蓄積抑制の二つの方法がある。

2.1 原子炉水中放射能濃度低減

福島第二・2号機の第1回定期検査では、第1サイクル運転中の原子炉水中のコバルト-58(^{58}Co)の濃度が高く、プラント停止時の原子炉一次冷却系配管表面線量率のうち ^{58}Co の比率は75%であった。この値は従来他号機実績値より大きい値であった¹⁾。この現象について、福島第二・2号機などの運

転実績をもとに研究し²⁾その結果、冷却水中のFeとNi比率のアンバランスにより発生し、対策としてNiの2倍以上のFeが必要なことを見いだした。すなわち、実験の結果、NiO及びCoOなどの単体酸化物が Fe_2NiO_4 及び Fe_2CoO_4 のような複合酸化物より一けた程度溶出しやすい。Ni及びCoの溶出を抑制するためには、Ni及びCoがFeと安定酸化物を作れるようFe/Ni比2以上が必要とされる。なお、冷却水中ではCo濃度はNi濃度の1%程度であるためCo、NiはNiで代表される。

運転初期のFe/Ni比制御対策としては給水中のFe量を微増することが有効であり、この方法として復水ろ過器に通水される復水の一部をバイパスさせることが考案され、福島第二・2号機の第1サイクル末期に実施確認された。その結果、図1に示すように第2サイクルの後半に十分な給水Fe濃度が得られた。更に、第3サイクルでは、Fe/Ni比は良好で、原子炉水中の放射能濃度は、 $^{60}\text{Co}=20\text{ }\mu\text{Ci/ml}$ 、 $^{58}\text{Co}=200\text{ }\mu\text{Ci/ml}$ と低レベルで安定しており、同サイクル後の第3回定期検査時には、原子炉冷却材一次系配管の表面線量率が低下し、原子炉冷却材再循環系配管表面線量率は図2に示すように、第1回定期検査時に対し、第3回定期検査時ではほぼ $\frac{1}{2}$ まで低下してきている。

福島第二・2号機に続いて運転を開始したプラントでも、復水フィルタバイパスによるFe/Ni比制御が実施された³⁾。図3にそれらの給水中のFe濃度及び原子炉水放射能濃度の推移を示す。これより、復水フィルタバイパス時期が早いほど原子炉水放射能濃度の低下が速いが、まだ原子炉水放射能濃度に初期ピークが見られる。これは、運転初期の給水中Ni濃度の高い時期に給水中Fe濃度が十分でないためである。

また、復水フィルタをバイパスしてもその下流側に復水脱塩器が設置されており、Fe濃度は脱塩器の除鉄性能に依存するため、Fe濃度制御が難しい。福島第二・4号機に対し、こ

* 日立製作所日立工場 ** 日立エンジニアリング株式会社

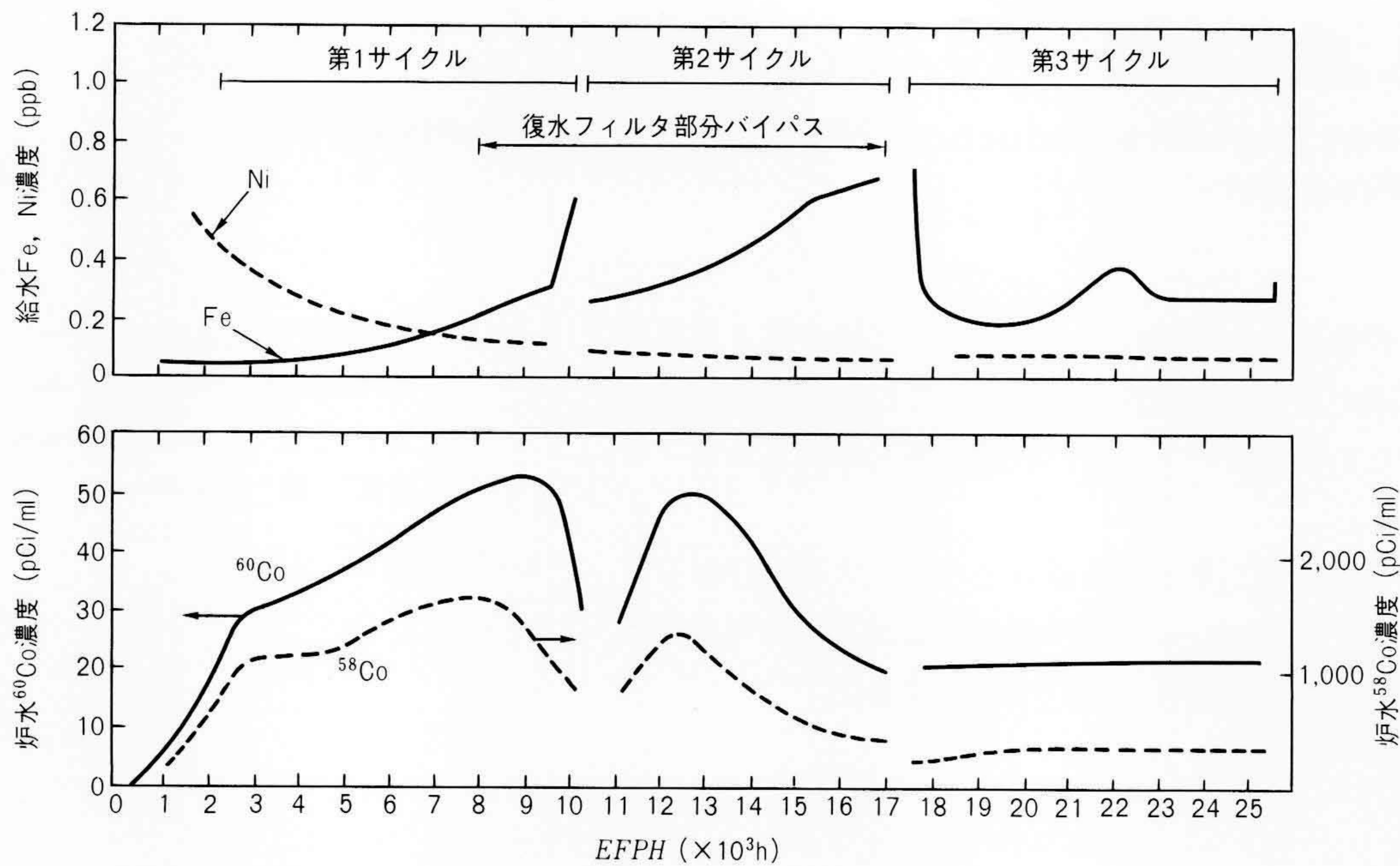
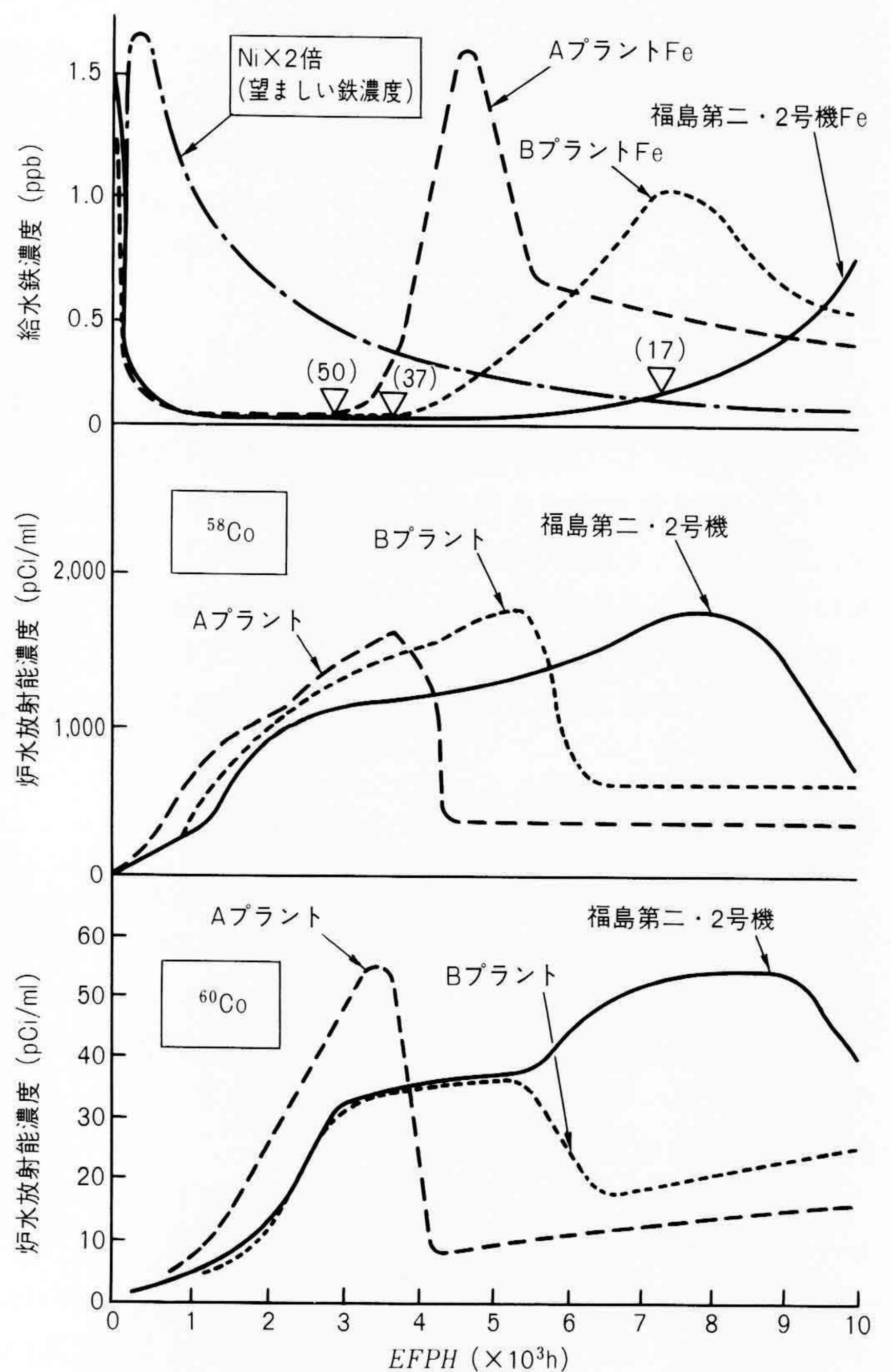
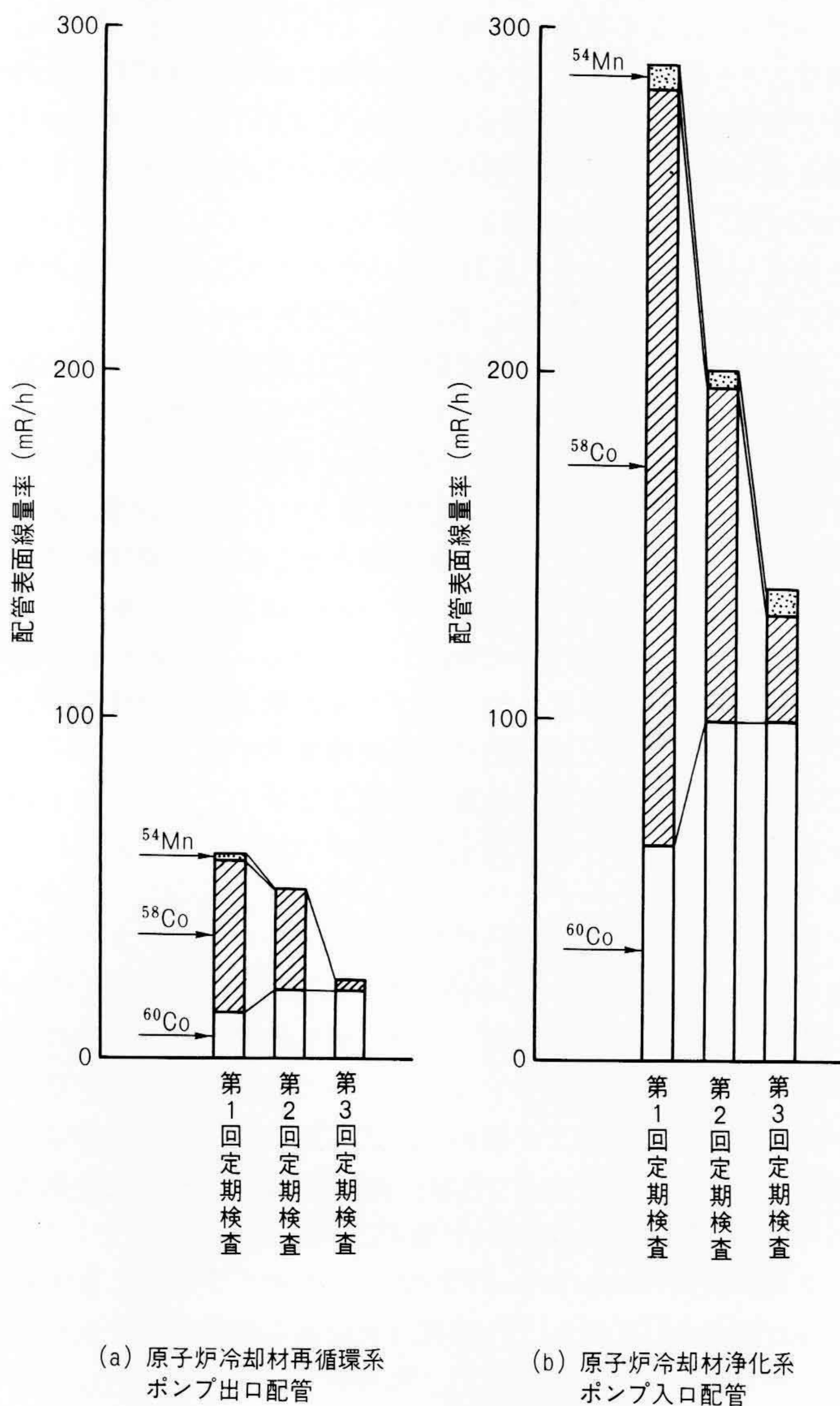


図1 福島第二・2号機給水Fe濃度と炉水放射能濃度変化
福島第二・2号機では、第2サイクル末まで給水Fe濃度が不足したため、復水フィルタのバイパスを継続した。第3サイクルは、復水フィルタをバイパスしないで安定した運転が可能となった。

注：略語説明 EFPH(Effective Full Power Hour：実効出力運転時間)



注：▽は復水フィルタバイパス時期、小括弧内の数字はバイパス容量(%)

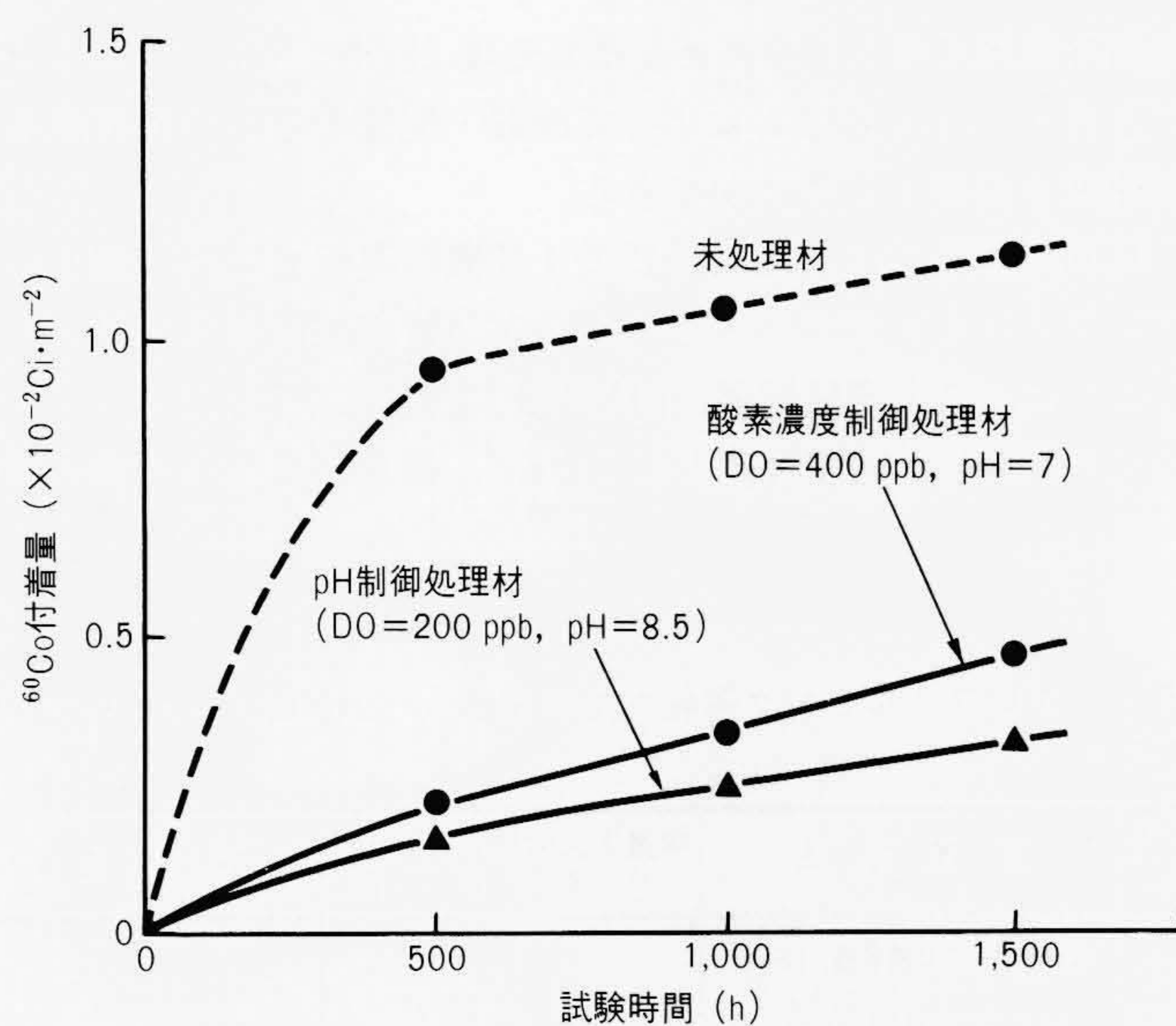
図2 福島第二・2号機配管線量率変化 福島第二・2号機配管線量率は、 ^{58}Co の寄与率の低下に伴い定期検査ごとに低くなってきている。また、 ^{60}Co の寄与は第2回と第3回がほぼ同等で平衡に達している。

図3 給水Fe濃度と炉水放射能濃度変化 給水Fe濃度上昇時期は、復水フィルタバイパス時期が早いほど、またバイパス容量が大きいほど速い。しかし、3,000 EFPHごろに炉水放射能濃度のピークを生じる。

れまでの実績から必要な給水Fe濃度の予想曲線を作成し、更に制御性の良い電解鉄注入装置を開発し、福島第二・2号機で短期間注入試験を実施した。まず、起動試験期間中から復水フィルタのバイパスを行い、給水Fe濃度増加を図った。しかし、復水フィルタ入口のFe濃度が4 ppbと低いこと、及び復水脱塩器の鉄除去性能が高いことから、給水Fe濃度が上昇しなかった。このため、電解鉄発生装置を用いFe注入を実施した。Fe注入に使用した電解鉄発生装置は純水中でFe電極からFeイオンを発生させ、微量なFeを復水中に注入可能としたものである。Fe注入の結果、給水Fe濃度は1 ppb程度に増加し、所期の目標に近いFe/Ni比制御ができた。また、原子炉水放射能濃度は、図4のAプラント例など先行機に見られた濃度ピークを経験することなく運転を継続している。

2.2 機器・配管への放射能蓄積量抑制

原子炉一次冷却系の機器・配管などを構成するステンレス鋼などの内面は、酸化皮膜で覆われている。この皮膜は、プラント運開とともに形成を始め、成長とともに接触する原子炉水中の放射能を取り込む。放射能の取込み方は初期に大きく、接触する水の条件によって異なる。したがって、原子炉水中の放射能が全くないか、あるいはその濃度が低い時点に



注：略語説明 DO(溶存酸素濃度)

図5 実験室におけるプレフィルミング効果確認結果 処理水のpHあるいはDO(溶存酸素濃度)を制御して、プレフィルミングを行うことによって ^{60}Co の付着を抑制できる。またその効果は、両者ともほぼ同等であった。

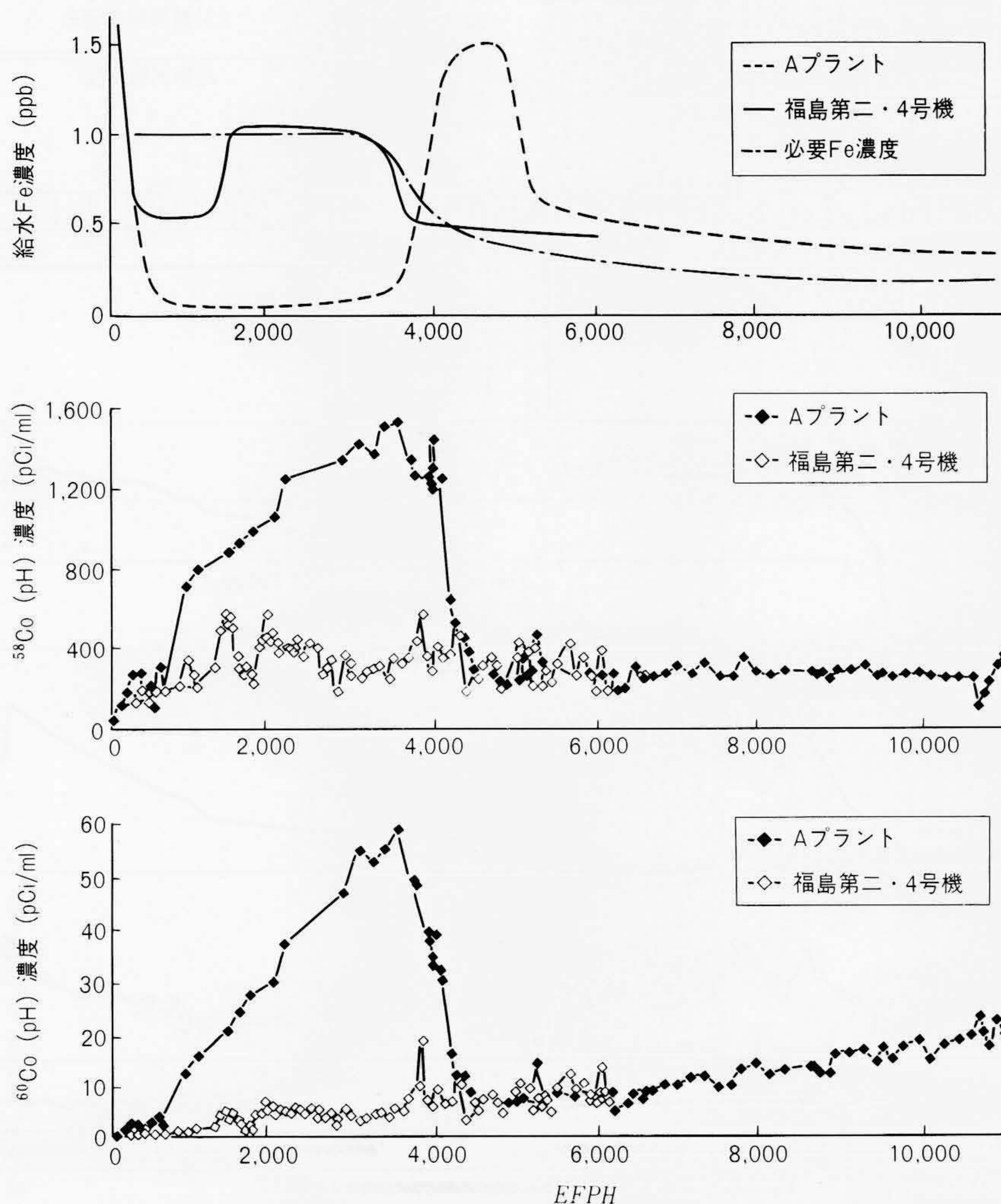


図4 福島第二・4号機炉水放射能濃度の先行プラント比較 福島第二・4号機では、Fe注入により運転初期から必要量の給水Fe濃度を維持できたため、先行プラントに見られた放射能ピークを持たず運転を継続している。

適当な保護皮膜を形成させる表面処理（以下、プレフィルミングと言う。）を行うことによって機器・配管などへの放射能蓄積速度を抑制することができる。

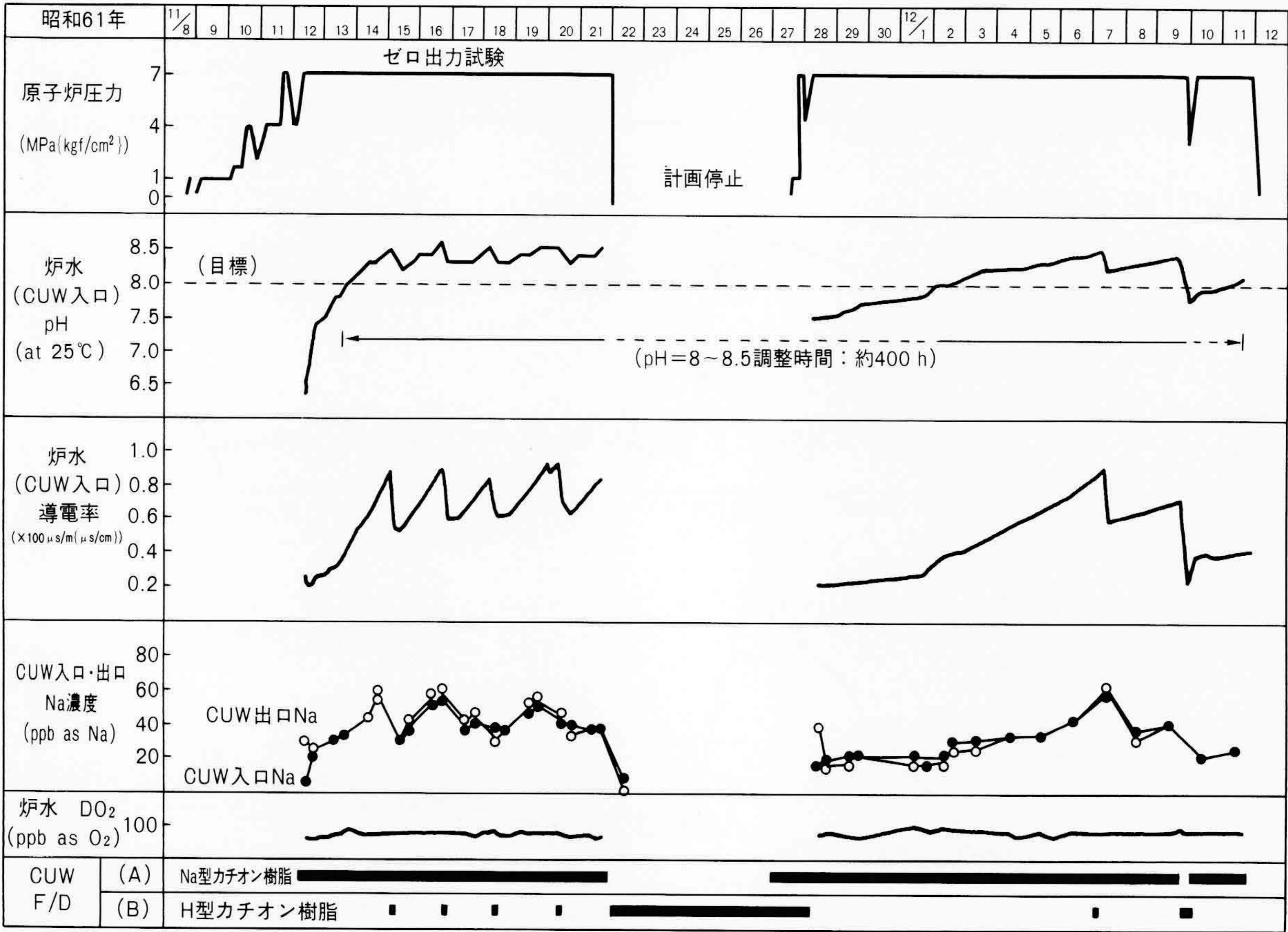
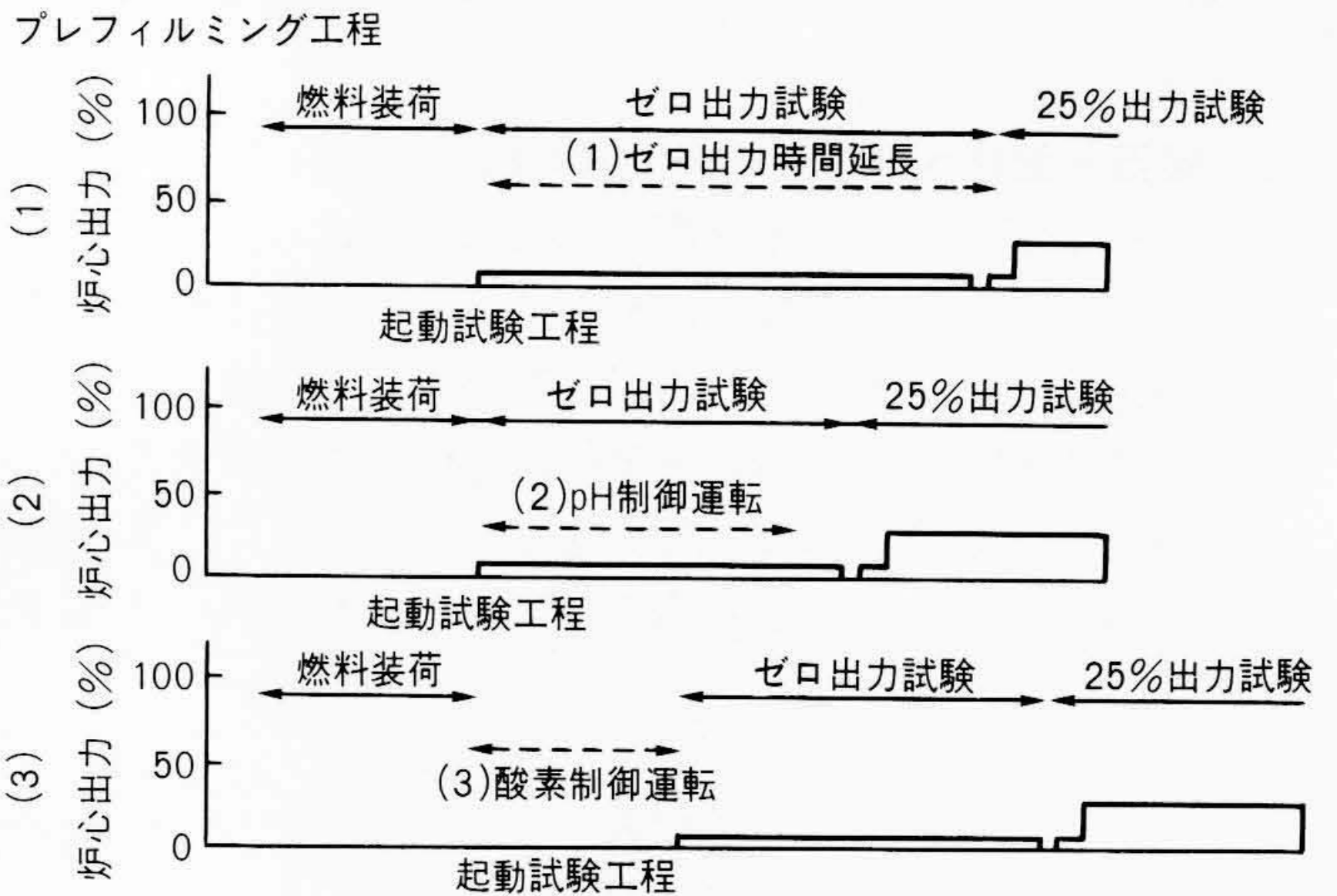
日立製作所では、福島第二・4号機の運転までに、図5のプレフィルミングテストピースへのCo付着試験結果に見られるように、酸素濃度制御、pH制御など各種のプレフィルミング法を開発し、適用可能としている⁴⁾。福島第二・4号機の場合、

合は、表1の所要時間、効果、経済性などの比較による総合評価を行い、原子炉水のpHを弱アルカリ(pH=8~8.5)に制御する方法を実施することになった。図6に実施時の原子炉水水質経緯を示す。プレフィルミング時の原子炉水のpH管理は、原子炉冷却材浄化系の汙過脱塩器2塔のうち1塔にNa型のカチオン粉末樹脂を、もう1塔にH型のカチオン粉末樹脂をアニオン粉末樹脂とともにプリコートすることにより行った。

表1 プレフィルミング運転方法の選定 pH制御プレフィルミング運転は、核加熱試験と同時に実施でき、工程延長を必要としないことが特徴である。

No.	運 転 方 法	線量率低減効果	工程への影響	評 価
—	福島第二・2号機実績, pH=7 (ゼロ出力時間: 450 h)	(ベース)	—	—
(1)	ゼロ出力時間延長, pH=7 (ゼロ出力時間: 700 h)	-5%	福島第二・4号機計画内	工程への影響なし 効果が小さい。
(2)	pH制御運転, pH=8~8.5 (pH調整時間: 240~400 h)	-18~20%	福島第二・4号機計画内	工程への影響なし 効果大 採用
(3)	酸素制御運転 (ゼロ出力前: 300 h)pH=7 (ゼロ出力時間: 400 h)	-18~20%	工程変更要	工程への影響あり 効果大 PLRポンプ加熱要す。

注：略語説明 PLRポンプ（原子炉再循環ポンプ）



注：略語説明 CUW(原子炉冷却材浄化系), F/D(汙過脱塩塔)

図6 プレフィルミング運転実績及び水質挙動 Naを負荷したCUW F/D-(A)系の通水によって、炉水中のNa濃度の上昇を図った。炉水pHを目標の8~8.5の間に維持できた期間は約400時間であった。

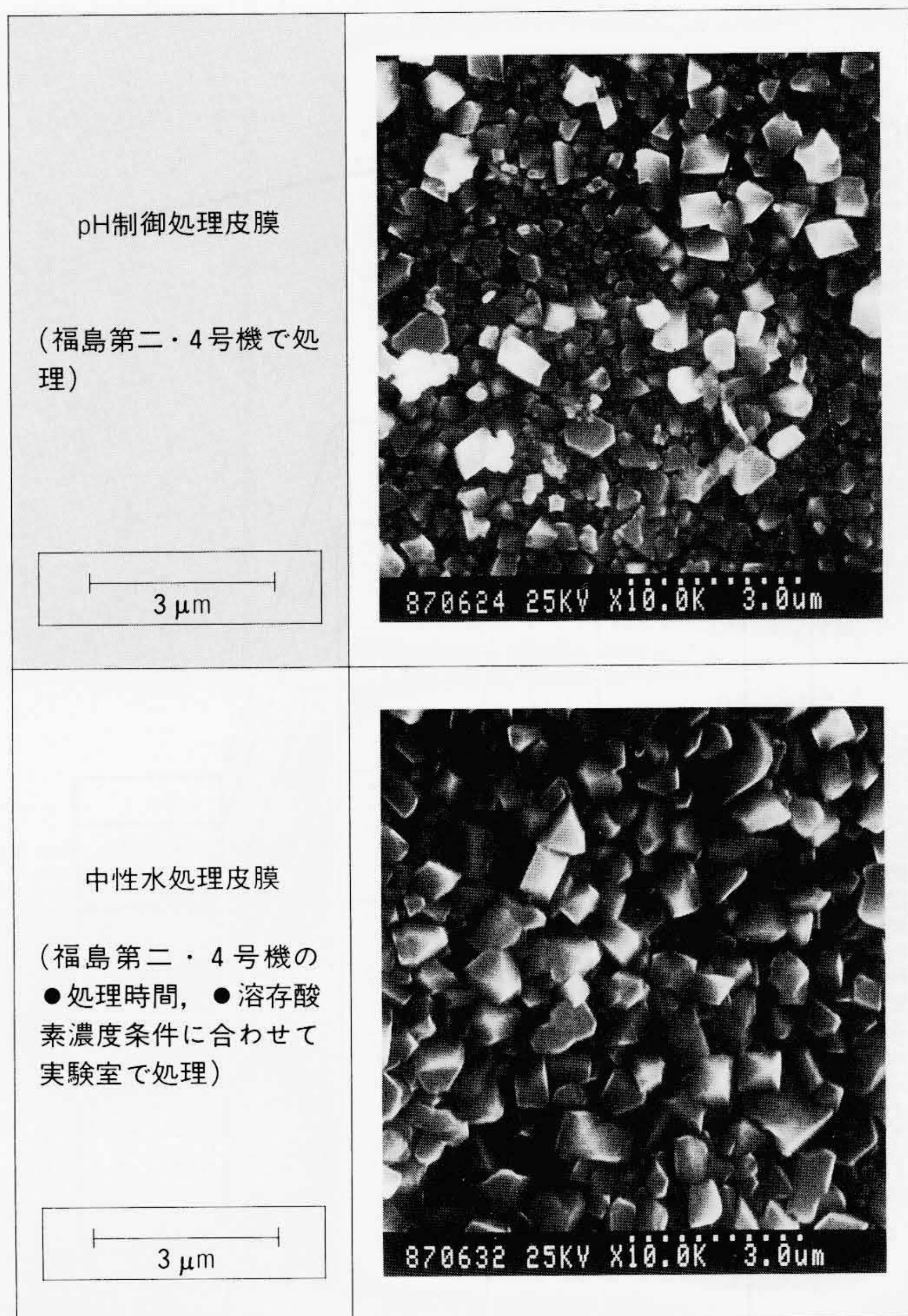


図7 pH制御プレフィルミング皮膜特性 福島第二・4号機で処理した皮膜の結晶粒径は、中性水中で同一条件下で形成した皮膜の結晶粒径よりも小さく、ち密になっている。

pHを上昇させる場合はNa型の樹脂からNaを微小溶出させ、pHが上限になった際にH型の樹脂塔を運転することによってNaを除去し、pHの調整を行った。この処理による保護皮膜と中性条件で処理した皮膜を比較して図7に示す。弱アルカリ処理により均一で微細な結晶粒ができていることが分かる。

プレフィルミングをしたステンレス鋼とプレフィルミングしていないステンレス鋼のテストピースを、100%出力試験時まで原子炉水中に浸せきし取り出して測定評価した結果、プレフィルミングを行ったテストピースの放射能蓄積量のほうが少ないことが確認された。

2.3 福島第二・4号機の運転状況

4号機は第1サイクルの半分以上を経過したが、Fe濃度を予定曲線どおり制御でき、炉水放射能濃度のピークをなくすことができ、原子炉浄化系配管線量率も図8に示すように先行機よりも低いレベルで維持されている。

3 線量管理の改善対策

従事者が受ける放射線量は、作業場所の線量率と従事者のその場所に滞在する時間の積である。このため、図9に示す

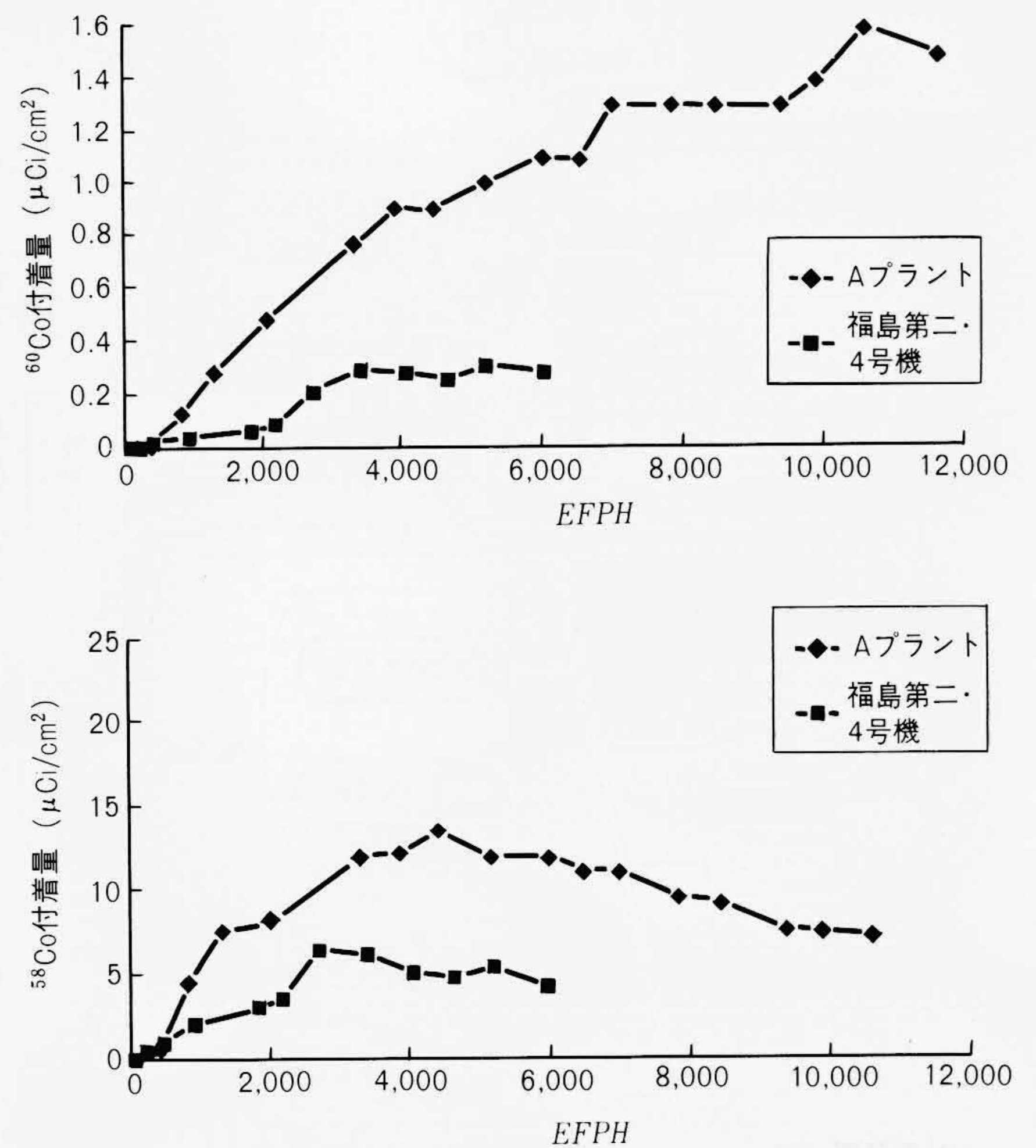


図8 福島第二・4号機の原子炉浄化系配管付着放射能 福島第二・4号機では原子炉浄化系配管付着放射能の定期測定を実施しており、付着量の経時変化は先行機よりも少ない量で推移している。

ように従事者の受ける放射線量を低減させるためには、線量率を下げるか、従事時間を短くすればよい。作業場所での線量率を支配する放射線源が機器・配管である場合には、従事者との間に「遮へい」をしたり、配置変更や点検工具により「距離」をとったりする。作業によっては、遠隔自動の点検器具により「作業従事時間」を短くすることのほか、線源となる放射能そのものを低減することも重要である。従事者の放射線を受ける要因から考えると、放射能低減が基本であり最も効果的な低減対策と言える。したがって、BWR(沸騰水型原子炉)ではまず「放射能低減を主体とする作業環境の線量率低減」を第一に考え、それ以外に、局所的に線源が大きいところでは「作業性の改善を主体とする作業の合理化」や「作業の遠隔自動化」などで従事者の受ける放射線量を効果的に抑えている。

近年、原子力発電所の定期検査を実施する前に必ず従事者の受ける放射線量の予想を立てているが、一般的に実績値は予想値を下回る傾向で、この要因の一つとして教育や作業管理を含む合理的な時間管理や遮へいなどによる線量管理及び適切な時期のチェックの効果が挙げられている。具体的には、

- (1) 高線量率配管に設置する鉛毛マットなどの遮へい方法の改善
- (2) 線量率の時間減衰を考慮した定期検査工程の調整
- (3) 作業手順の見直し
- (4) 経験者による作業
- (5) モックアップトレーニングの強化

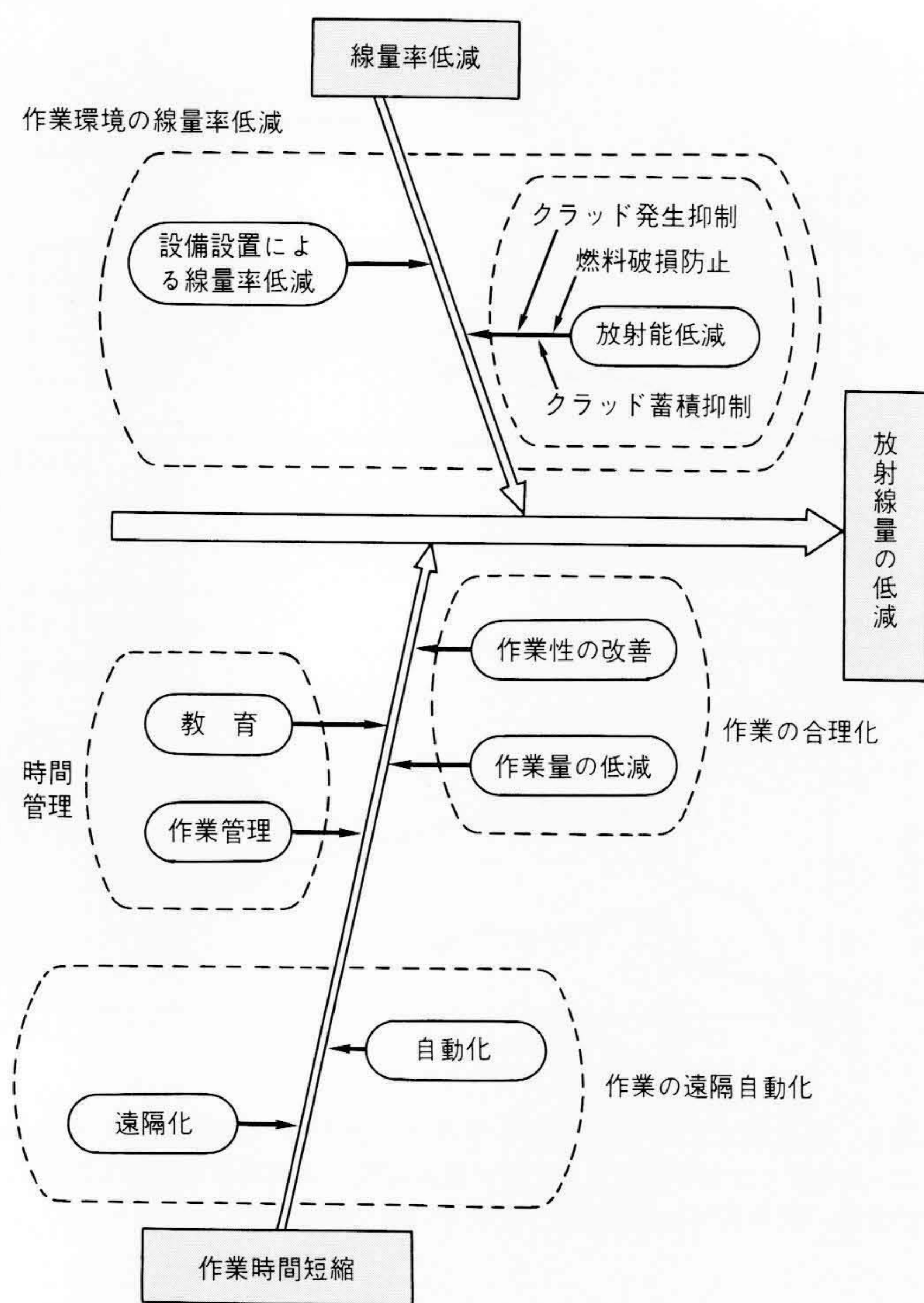


図9 放射線量の低減要因 線量低減要因は、作業環境の線量率低減、作業の合理化、及び作業の遠隔自動化、運用に大別されるが、その中でも線量率低減の効果が大きい。

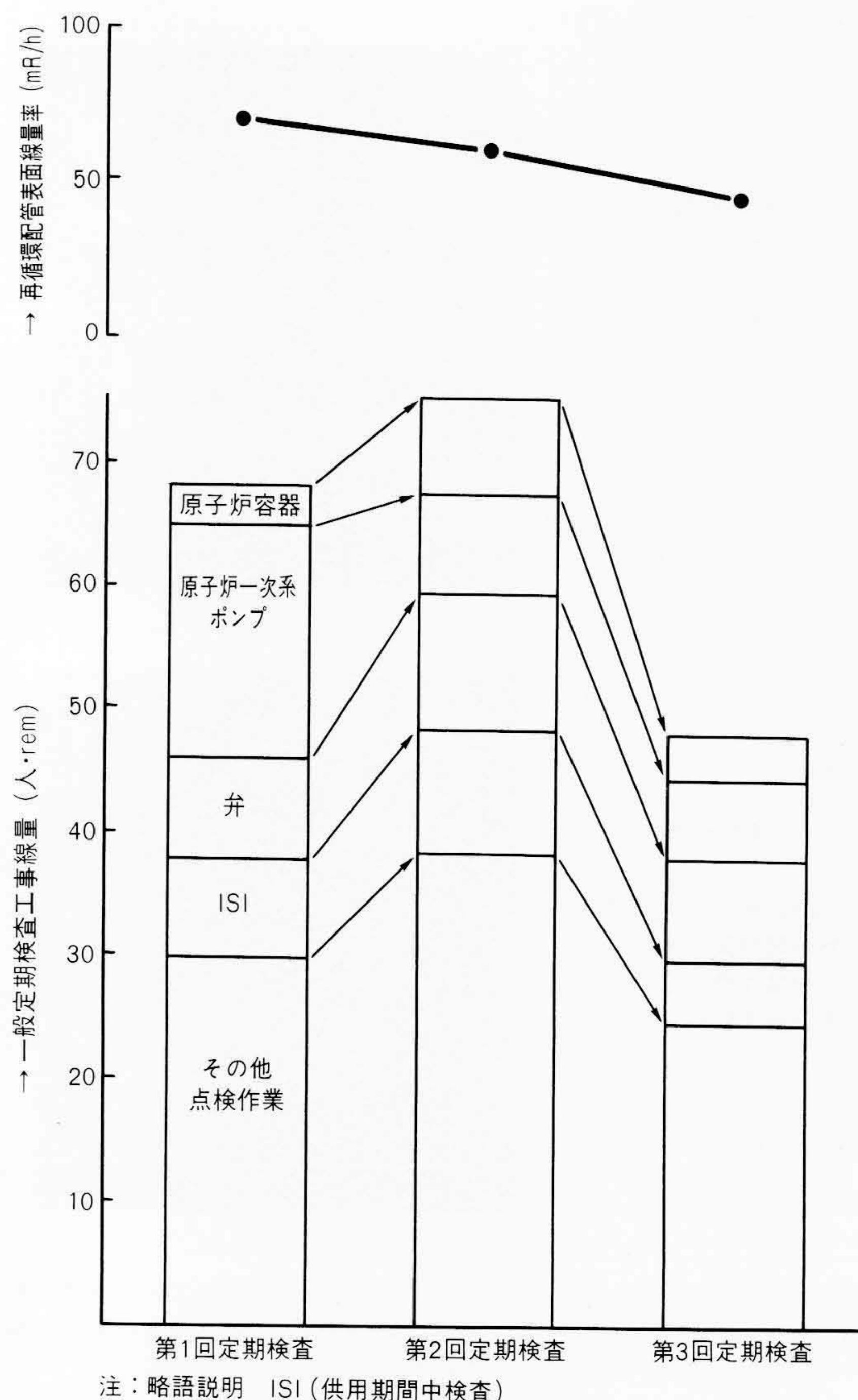


図10 福島第二・2号機定期検査時の従事者の受けた放射線量の推移 第3回定期検査では、従来の線量低減対策に加え、従事者の意識高揚など運用面の改善を行うことによって、線量低減効果が得られた。

(6) 除染方法の改善

(7) きめの細かい作業時間の管理

があり、漸次適用している。特に最近では、放射線量管理の一環として従事者が受ける放射線量の低減効果が注目されており、福島第二・2号機第3回定期検査では意識高揚のキャンペーンを行った。

その結果、福島第二・2号機第3回一般定期検査工事で発電所従事者が受けた放射線量は、図10に示すように0.47人Sv(47人rem)と第2回定期検査0.71人Sv(71人rem)に比べ0.24人Sv(24人rem)の低減ができた。低減要因の一つとしてこれらの改善が寄与しているものと考えている。

4 結 言

福島第二・2号機の運転実績をもとに開発した線量率低減対策を、福島第二・4号機に適用した。この結果、福島第二・4号機の原子炉水放射能濃度は先行機に比較し低いレベルに維持されている。

福島第二・4号機で採用した技術項目は、それ以降のプラントにも適用が計画されており、運転実績による改良で更に効果的な運転が可能となるよう計画している。

最後に、プラントの設計及び運転管理に当たり、御指導をいただいた東京電力株式会社の関係各位に対し、厚くお礼を申し上げる。

参考文献

- 1) 大角, 外: 低線量プラント設計技術とその実績, 日立評論, 68, 4, 319~324(昭61-4)
- 2) K. Ohsumi, et al.: Operating Experience with Water Chemistry in the No.2 Unit of Fukushima-Daini Nuclear Power Plant, Water Chemistry 4, 10, BNES(1986)
- 3) S. Uchida, et al.: BWR Plants with Low Radiation Level, J. Nucl. Sci. Eng. Technol., 24, 593(1987)
- 4) T. Honda, et al.: Suppression of Radiation Buildup on Stainless Steel, Corrosion 86, 261, NACE, (1986)