

低線量を目指した沸騰水型原子炉一次冷却系のシステム設計

Optimum Design for the Primary Cooling System in BWRs to Control Shutdown Radiation Dose Rate

近年、原子力発電所の稼働基数増加に伴い、その定期点検保守作業を円滑に実施する上でプラント停止時の線量率低減が強く望まれている。日立製作所では電気出力1,100MW級BWR原子力発電所の年間被曝線量を200マンレム(Man-Rem)/年以下に抑えるため、工業的に適用可能な被曝低減対策に関し検討を進めてきた。定期点検の通常点検作業の被曝線量は、再循環配管線量率にマクロ的に支配されるとみなされ、上記目標を達成するには配管線量率を30mR/hに抑制することで可能である。このため、線量率上昇に寄与する鉄クラッド及び⁶⁰Coイオンを一段と低減するため、給水系酸素注入、二重式復水浄化系に加えて耐食鋼と低コバルト材の採用増加を図った。適用範囲は線量率上昇予測コードによる寄与率評価と経済性を考慮して選定した。その結果、年間200マンレム以下を達成する低放射能システムが可能であることが確認できた。

三木 実* Minoru Miki
 齋藤達彌** Tatsuya Saitō
 内田俊介*** Shunsuke Uchida
 泉谷雅清**** Masakiyo Izumiya

1 緒 言

国内外のBWR(沸騰水型原子力発電所)の長期運転実績と放射能測定解析から、プラント停止時の放射線は配管及び機器内面に付着蓄積した放射性腐食生成物によるものであることが解明されてきた¹⁾。

日立製作所では、この放射性腐食生成物蓄積の低減方策として給水中のクラッド及び原子炉内での⁶⁰Coの発生抑制に焦点を絞り研究を行なってきた。中国電力株式会社島根原子力発電所の運転実績からプラント寿命期間中再循環配管表面線量率を50mR/h程度の低いレベルに抑制できる実績を得ている。この技術をベースに、BWRプラントのシステム環境に適切な材料選定を行なうとともに、金属の腐食を抑制し、かつ除去する水質管理法を併用することにより、次期電気出力1,100MW級BWRで年間被曝線量を200マンレム(Man-Rem)/年以下にすることが可能な見通しを得たので以下に報告する。

線量のおよそ $\frac{1}{3}$ を格納容器内作業が占めるため、マクロな表示としては、かなり良い相関性を示している。年間被曝線量の目標値を200マンレム/年とすると、プラント運転時の被曝線量は多目に見積っても40マンレム/年であるので、定検時での被曝線量を160マンレム/年以下とすることにより達成可能であり、同図からこの場合の配管表面線量率の目標値30mR/hが得られる。

なお、図1の再循環配管表面線量率と被曝の関係は既存プラントをベースとしたものであるが、通商産業省改良標準化策を中心として進められている被曝低減対策、一配置、構造の改良による作業性改善、検査、保守機器の自動化などを加味すると同図中の直線のこう配は更に小さくなる。

2 原子力発電所定期検査時被曝線量と再循環系配管表面線量率

年間被曝線量を見ると定期検査(以下、定検と略す。)時被曝が約80%を占め、プラント運転中の被曝量は20%程度であり比較的少なくなっている。

プラントの配置、構造、遮蔽を一定とした場合の格納容器内の停止時線量率を支配する再循環配管表面線量率と、マクロな原子力発電所の年間被曝線量との間にどのような関係があるかについて検討してみた。

従来、原子炉再循環系配管表面線量率がプラント放射能レベルの量的な代表指標を与えるものであることから、これを被曝低減対策効果の尺度に使用してきた。各プラントの改造工事を含まない通常定検作業による定検時被曝線量と再循環系配管表面線量率の実機実績を電気出力1,100MW級プラントに換算して図1に示した。定検時保守作業による被曝

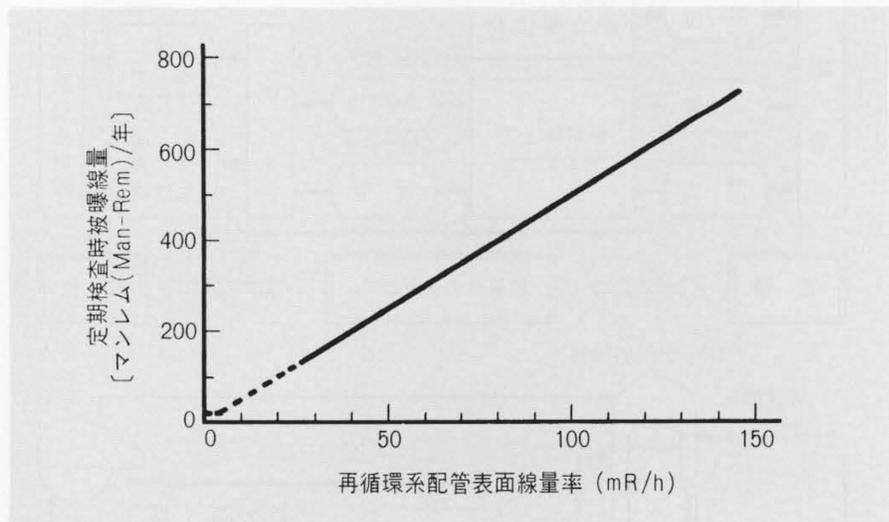


図1 再循環系配管表面線量率と定検時被曝線量(電気出力1,100MW級換算) 定検時被曝線量は改造工事を除いて表示した。格納容器内の定検時被曝線量は、定検作業の80%近くを占める。格納容器内線量率を規定する再循環系配管線量率と、定検時被曝線量はマクロ的な対応をもっている。

* 日立製作所日立工場 工学博士 ** 日立製作所原子力事業部 理学博士 *** 日立製作所エネルギー研究所 工学博士
 **** 日立製作所日立研究所 工学博士

3 線量率低減要因の分析

再循環系配管表面線量率は、炉水中の放射性腐食生成物、主として⁶⁰Coが機器、配管内面の酸化被膜中に付着し取り込まれることにより増大する²⁾。

炉水中の⁶⁰Coは主として次の二つのプロセスで生成される³⁾。

(1)主として給水中に溶解して原子炉へ持ち込まれたコバルトイオンが、同じく持ち込まれた鉄クラッドに吸着されて燃料棒表面に付着し、中性子照射を受けて⁶⁰Coとなり、その一部が炉水中に再溶出する。(2)炉内構造材が中性子照射を受け、材料中の含有コバルトが放射化されて⁶⁰Coとなり、その一部が炉水中に溶出する。したがって、炉水中の⁶⁰Co放射能を低減するためには、(a)コバルトイオンの燃料棒への付着、放射化のキャリアとなる鉄クラッドの低減、特に燃料に付着したクラッドが燃料の使用期間中はく離しない限界以下に低減する、(b)原子炉へ流入するコバルトイオンの低減、(c)炉内構造材中の⁶⁰Co生成量の低減、(d)炉水浄化設備による⁶⁰Coの除去、の四つの低減策が有効である。プラントの線量率を低減するために、上記の対策をプラント経済性を失わないように組み合わせることが必要である。

組合せによる線量低減効果を定量的に予測評価するため、**図2**に示す既開発の線量率評価モデルを用いて効果を予測計算した。

3.1 線量率評価モデル

日立製作所ではBWRプラントの炉停止時での一次系機器配管周辺の線量率を予測して線量率低減策の有効性を評価するため、冷却水中の腐食生成物の発生、放射化、移行、蓄積をモデル化して数式化した線量率予測コードを開発している⁴⁾。本モデルの特徴は次の3点である。(1)放射性腐食生成物として線量率に最も寄与の大きな⁶⁰Coの挙動に着目した。(2)冷却水中の⁶⁰Coをイオン(可溶性成分)とクラッド(酸化鉄と挙動を共にする不溶性成分)に分けて挙動を評価している。(3)燃料棒表面に付着する鉄クラッドにコバルトイオンが吸着され、燃料棒

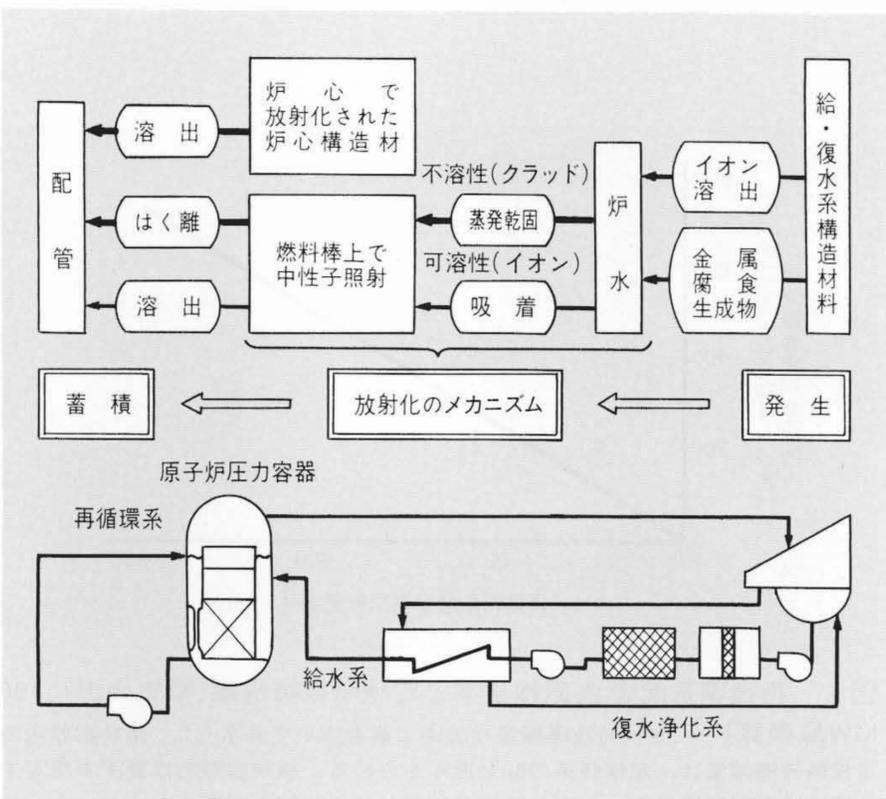


図2 腐食生成物の挙動モデル 復水系及びその上流の炭素鋼構造材から鉄を主とした腐食生成物が発生する。構造材ステンレス鋼、ステライト材などからコバルトイオンが溶出する。コバルトイオンは鉄クラッドに吸着され、燃料棒上で放射化され⁶⁰Coとなる。燃料棒及び炉心構造材の⁶⁰Coは、溶出あるいははく離し、配管に付着して線量上昇の原因となる。

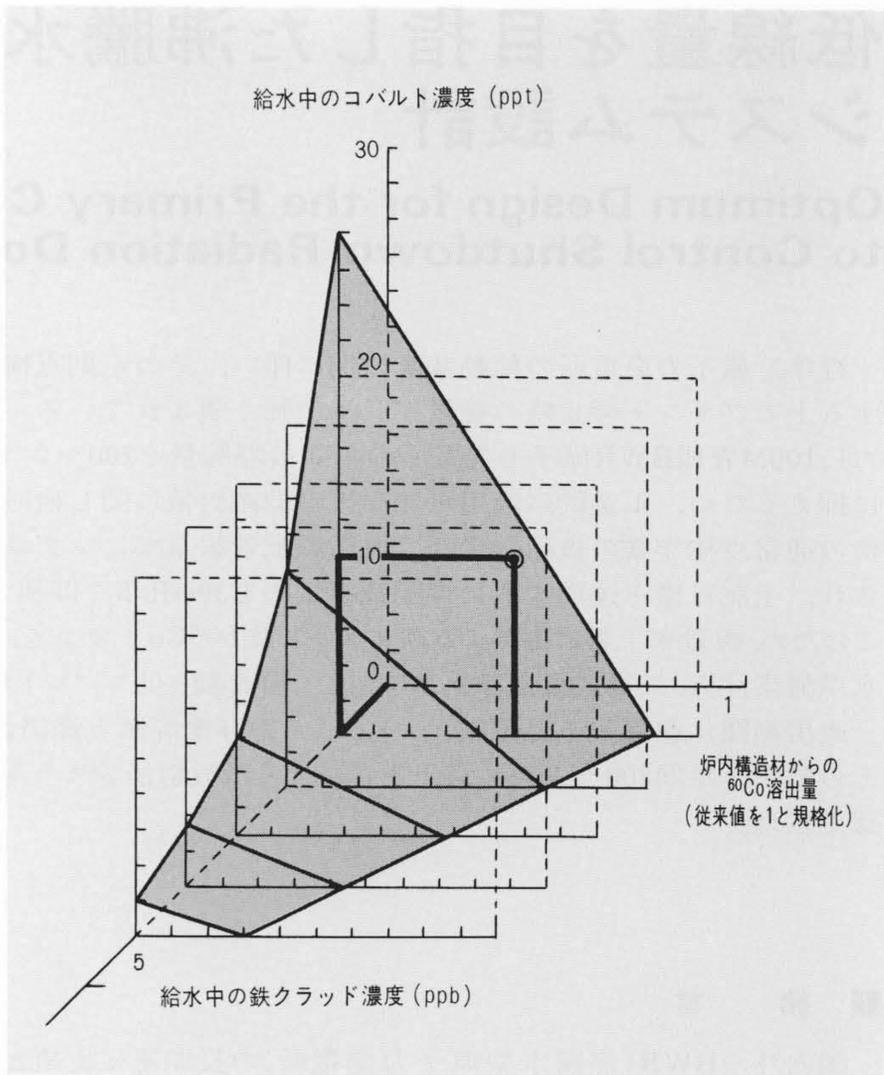


図3 配管線量率目標達成のための3次元曲面(炉浄化系容量2%) 再循環系配管表面線量を50mR/h以下に維持するため、給水中のコバルト濃度、給水中の鉄クラッド濃度及び炉内構造材からの溶出割合は相互に関連し、3次元曲面以下の条件とすると目標線量率以下にすることができる。

上で放射化して⁶⁰Coが生ずる。これが溶出して配管、機器の表面酸化膜に取り込まれるとしていることである。線量率上昇予測計算結果は、中国電力株式会社島根原子力発電所、日本原子力発電株式会社敦賀発電所、Nine Mile Point 1など国内外プラントでの実績値とよく一致し、モデルの妥当性を示している。モデルは更に⁵⁸Co、⁵⁴Mn、⁵⁹Feなど⁶⁰Co以外で被曝の原因となる主要核種に対しても計算が可能ないように改良し、本稿ではこの改良モデルにより予測計算を行なった。

3.2 低減要因の定量的分析

原子炉浄化系容量を給水流量の2%とした場合で、線量上昇の基本要因である金属濃度を相互に組み合わせ、第1ステップとして再循環系配管表面線量率が50mR/hの場合の必要条件を求めた。**図3**に計算で求められた給水中の鉄クラッド濃度、給水中のコバルト濃度及び炉内構造材からの⁶⁰Co溶出量の関係を示すが、同図中の3次元曲面以下にあれば目標達成可能である。この結果、給水鉄濃度、給水コバルト濃度をそれぞれ1ppb、10pptにまで低減しても線量率低減目標には不十分で、更に炉内構造材を改善し、⁶⁰Co溶出量を少なくとも現在の $\frac{1}{5}$ 以下に抑制することが必要であることを示している。

4 鉄クラッド低減対策

一次冷却系内で発生する鉄クラッドのほとんどは給、復水及び蒸気系の配管材、並びに給水ヒータ胴体材及び復水器の材質としての炭素鋼の腐食によるものである。炉心への鉄クラッド流入抑制という点から、鉄クラッド発生箇所は復水浄化系の上流及び下流側と2分して考えると、下流側の給水系統での鉄クラッド発生は給水への酸素ガス注入によりほとんど完全に抑制されており、発生量としては無視できる。一方、

復水浄化系上流側で発生する鉄クラッドに対しては、汙過脱塩器を復水脱塩器に前置する二重式復水浄化系を採用することにより95%以上を除去することが可能であり、炉心への持ち込み量は鉄クラッド1 ppb以下の実績をもっている。したがって、鉄クラッドに対しては既存実証技術で目標達成可能である。しかし、水質管理を容易にするとともに配管機器の使用期間を長くすること、及び廃棄物発生量低減の要望は大きく、この見地から更に鉄系の腐食量を抑制し、クラッド発生量及び除去用フィルタ材廃棄物量を低減することが望ましい。このため、タービン系の腐食生成物発生量の多い部分に耐食鋼を採用した。従来のクラッド発生量と比較し図4に示すように、復水鉄クラッド濃度は耐食鋼の採用により約 $\frac{1}{3}$ に減少し、10ppbとなる。また脱塩器通過後の給水鉄クラッド濃度も入口クラッド濃度が減少することにより1 ppbから0.3ppbに低下する。

一方、復水中の鉄クラッド量が減少するため、汙過脱塩器の樹脂の寿命を3倍にすることが可能となり、廃樹脂量も $\frac{1}{3}$ に減少される。

5 コバルト低減対策

5.1 コバルト発生源の分析と低減対策

実機での原子炉入口給水中のコバルト濃度としては、数ppt～20ppt前後の値が実測されている。この極度に低い濃度では実機プラントのサンプリング系の主要構成材であるコバルト合金(ステライト)シートをもつステンレス製弁、配管などからのコバルト溶出も影響して、プラント設計条件により得られるデータのばらつきが大きい。このため、一次冷却系機器、配管の接水表面積、溶出速度及び材質中のコバルト含有率が

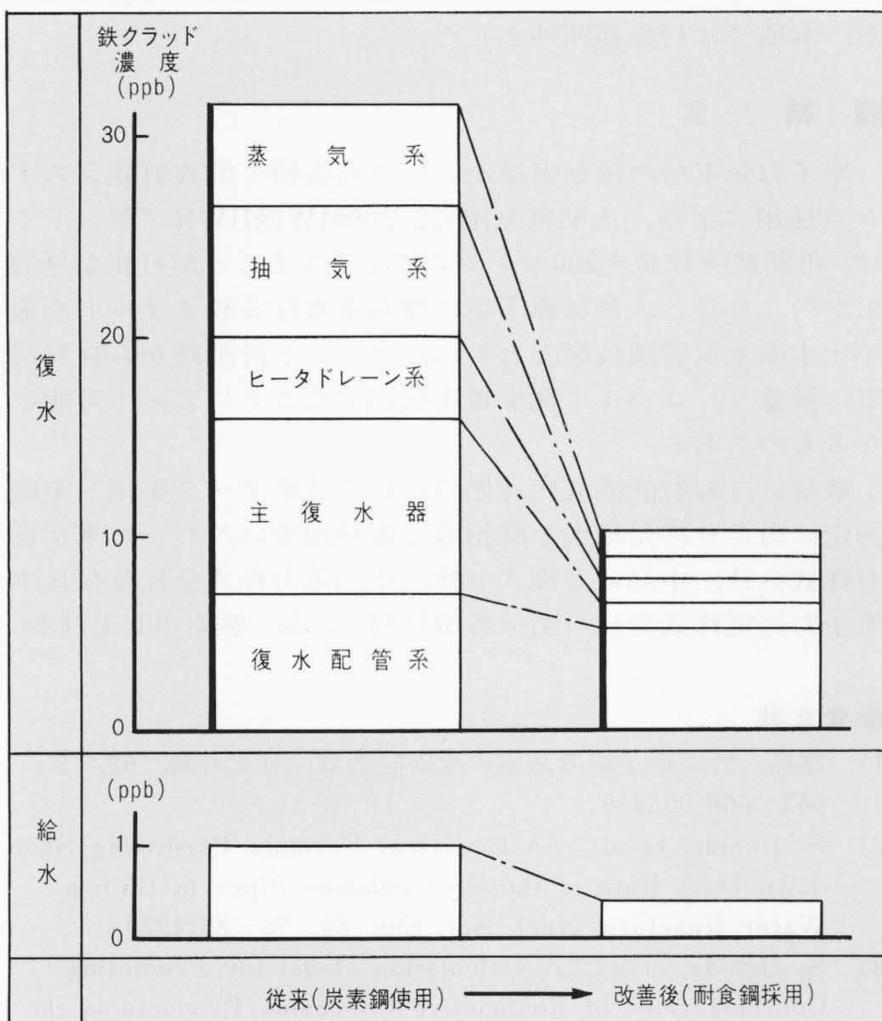


図4 復水及び給水鉄クラッド濃度の改善効果 蒸気系、抽気系、ヒータドレン系、主復水器及び復水配管系は、従来は炭素鋼を用いていた。改善策として耐食鋼を使用すると、復水中の鉄クラッドを10ppbと低減することが可能である。また、脱塩器通過後の給水鉄クラッド濃度も $\frac{1}{3}$ に低下される。なお、給水系では、酸素制御により鉄の発生は完全に抑制されている。

ら発生量を計算評価した。

図5にコバルト発生源と計算発生量を示す。従来、給水加熱器の熱交換器チューブはステンレス鋼製で、コバルトは不純物として0.25%程度含有されているだけであるが、接水面積が大きく、コバルト発生量は大きい。しかも、復水浄化系の下流に位置し、そのまま炉内に流入するため給水系から持ち込まれる全コバルトイオンに対し約70%を占めている。給水ヒータ用ステンレス鋼のコバルト成分を0.05%に低減することにより、給水中のコバルト濃度は図5に示すように20pptから10pptと低下させることが可能である。

5.2 ^{60}Co 発生源の解析と低減対策

炉水中の ^{60}Co の発生源は、炉内構造材からの ^{60}Co の溶出と燃料棒に付着したコバルトが放射化し再溶出したものに大別されるが、両者の寄与を定量的に区別するには、理論的な解析が必要である。炉内構造物各機器の平均中性子束及びコバルト含有率から ^{60}Co 蓄積量を求め、炉内腐食環境(温度:285℃、溶存酸素濃度:200ppb)での溶出速度を用いて、各機器ごとの ^{60}Co 溶出量を計算で求めた。従来、制御棒ピン、ローラはコバルト含有率が約50%のステライト合金を用いていたが、これはコバルトを含有しないニッケル基合金を使用し、制御棒のシースのステンレス鋼と燃料集合体スペーサばねのインコネル材を低コバルト材に規制するなどの改善策により、図5(a)に示すように約 $\frac{1}{3}$ に低減できる。

5.3 原子炉浄化系容量の効果

原子炉浄化系容量を増加することにより再循環系配管表面線量率は低く抑制でき、しかも給水中のコバルト濃度を低コバルト材採用により10pptとすれば予測値は更に低減可能なことを図5(b)に示す。しかし、炉浄化装置はイオン交換樹脂を

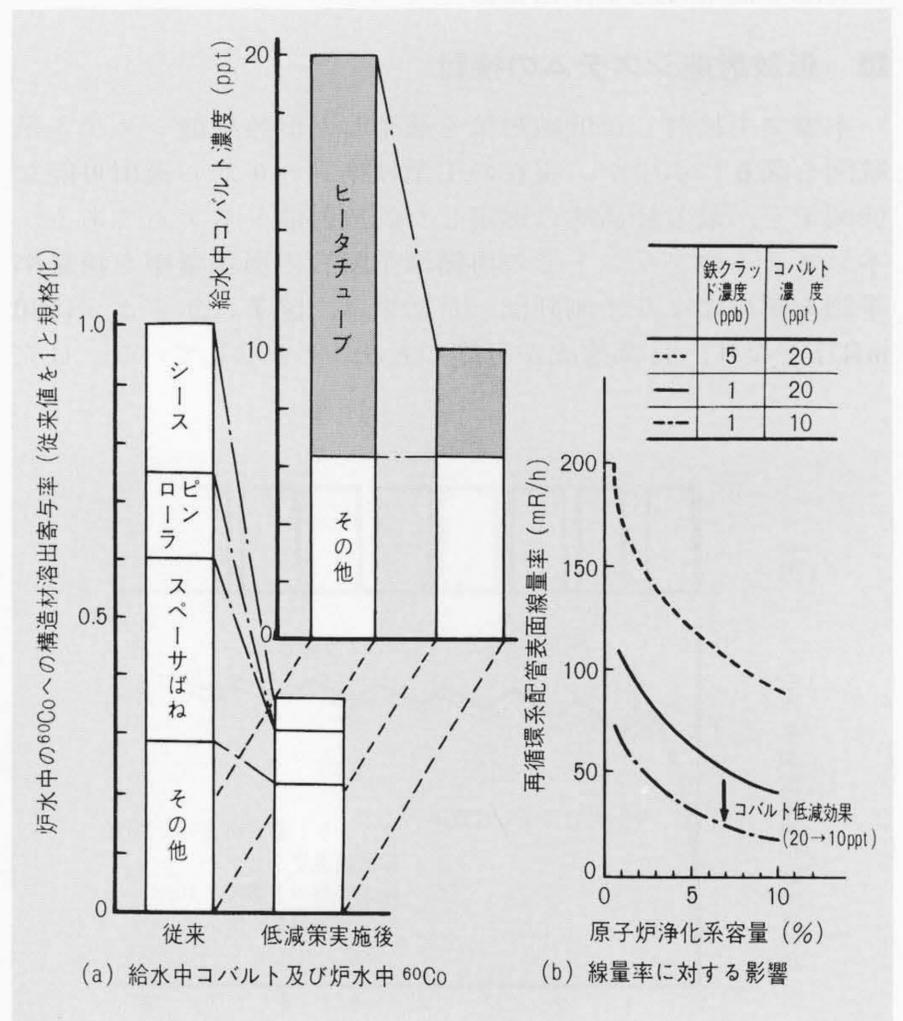


図5 コバルト低減策とその効果 低コバルト材採用により給水中コバルトイオン濃度は $\frac{1}{2}$ に、炉内構造材からの ^{60}Co 溶出量は $\frac{1}{3}$ に低減される。その結果、 ^{60}Co 全発生量は約40%に低減される。また、コバルト発生量を低減することにより原子炉浄化系容量を小さくできる。

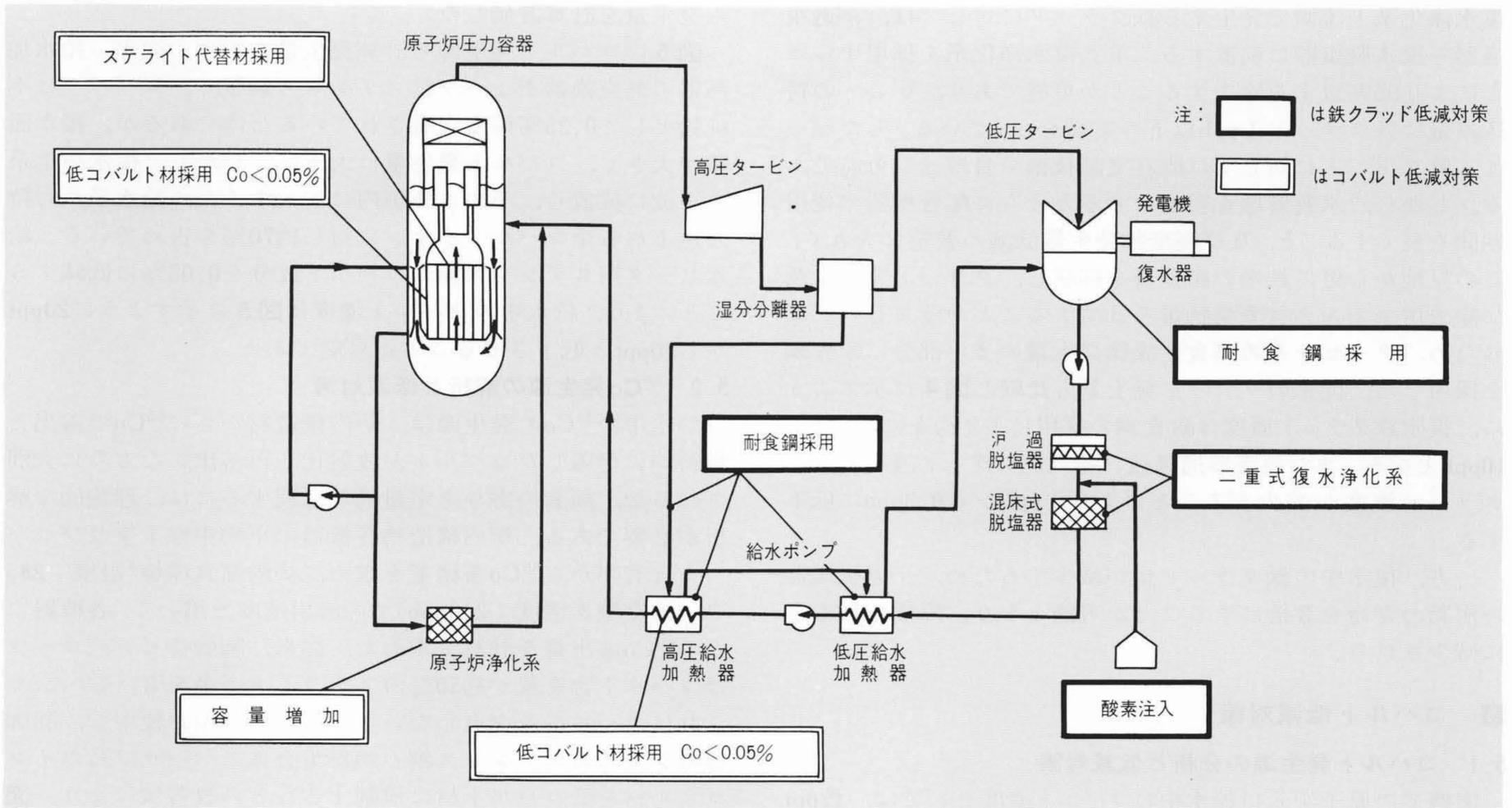


図6 低放射能システム 改良標準化に採用された項目に加え、更に構成材料対策を行なうことにより、年間被曝線量200マンレム(Man-Rem)/年が達成可能となった。

用いているため高温の炉水は通水できず、冷却して通水するためその使用は熱損失を伴う。したがって、線量率低減とプラント熱効率の面から最適な原子炉浄化系容量を選択し使用している。更に、次期技術として熱損失が小さくできるように高温で使用可能な浄化装置の開発も行なっている。

6 低放射能システムの検討

本論文で検討した低減対策を適用した低放射能システム系統図を図6に示すが、現在の工業技術レベルから適用可能な低減策を、最も経済的に選定した低放射能システムである。本システムのプラントでの再循環系配管表面線量率を線量率予測モデルにより予測評価した結果は、図7に示すように30 mR/hとなり、目標達成が可能であることを示している。日立

製作所としては、本方式を今後の新設プラントに適用するとともに即設プラントの改善としても推奨したい。

なお、被曝低減策としては本稿で述べたプラント放射能低減技術以外にも、配置及び遮蔽の改良、保守点検装置の自動化、ロボット化などがあり、更に被曝量の低減が可能であるが、本稿では対象範囲外とした。

7 結 言

原子力発電所の運転実績からの技術蓄積と低放射能システムの採用により、次期電気出力1,100MW級BWRプラントでは、年間被曝線量を200マンレム以下とすることが可能な見通しが得られた。これは原子炉に持ち込まれる鉄クラッドを最小化する水質管理技術とともに、プラント計画時から材料選定に留意し、コバルト発生量を低減することによって可能となるものである。

最後に、放射能低減化評価のための技術データ集積、実機測定に当たり終始絶大な御指導と御援助をいただいた東京電力株式会社、中部電力株式会社、中国電力株式会社及び日本原子力発電株式会社の関係各位に対し、深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 高島, 外: 原子炉冷却水の放射能低減, 日立評論, 62, 9, 663~666(昭55-9)
- 2) S. Uchida, et al.: An Empirical Formula Predicting Shutdown Dose Rate of the Recirculation Pipes in Boiling Water Reactors, Nucl. Sci. Eng. 69, 78~85(1979)
- 3) S. Uchida, et al.: A Calculation Model for Predicting Concentrations of Radioactive Corrosion Products in the Primary Coolant of Boiling Water Reactors, Nucl. Sci. Eng. 67, 247~254(1978)
- 4) S. Uchida, et al.: Estimation of Shutdown Dose Rate on Recirculation Pipes during Operating Life of BWR, J. Nucl. Sci. Tech. 17, No. 2, 119~128(1980-2)

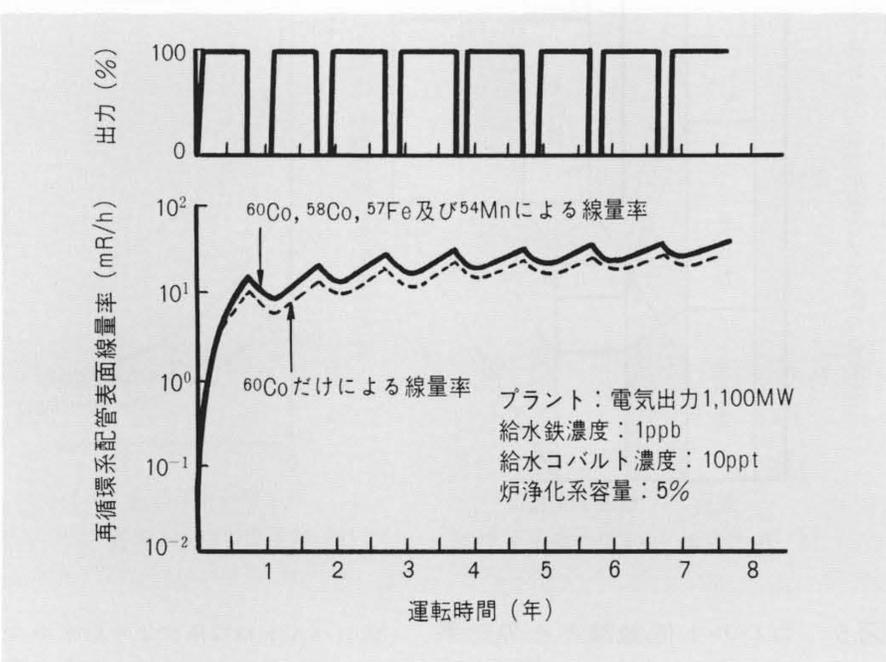


図7 低放射能システムプラントの線量率の経年変化 推奨低放射能プラントに対し、線量率予測モデルを用いて計算を行なうと、再循環系配管表面線量率は運転開始後数年で飽和し、30mR/hに抑制される。