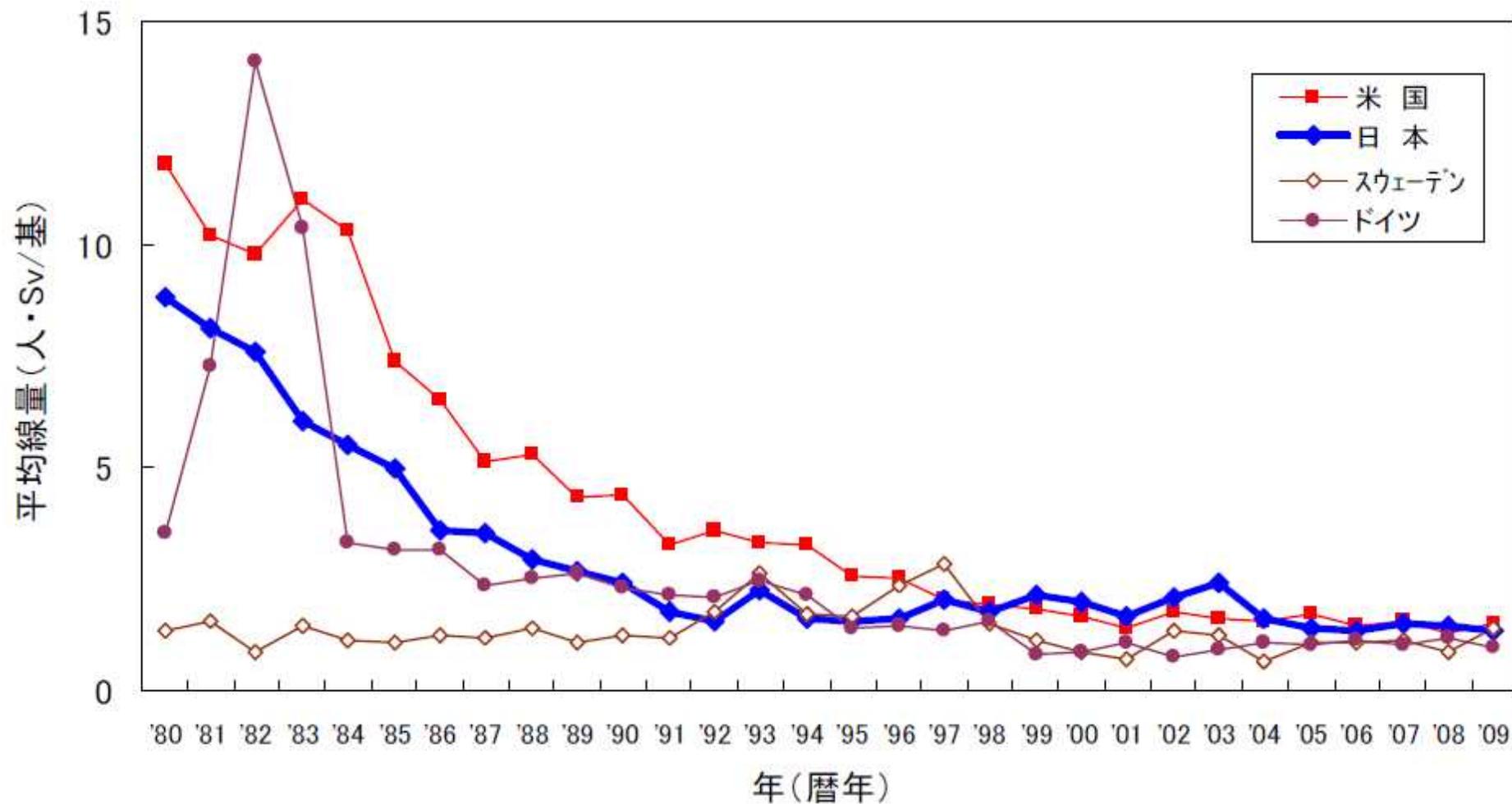


東京電力における線源低減の取り組み

2016.11.18

東京電力ホールディングス株式会社
原子力運営管理部 放射線管理G
鈴木 純一

- BWRプラントでは、
 - 原子炉格納容器の大型化による作業性の向上
 - 復水ろ過装置（CF）の設置や酸素注入などによる，放射線源となり得る腐食生成物の抑制
 - 制御棒駆動機構の自動交換の採用などといった改良標準化を行い，また，原子炉水の放射能濃度制御（Ni/Fe制御）などの水化学管理による対策を講じてきた。
- これにより，原子力発電所1基当たりの集団線量は1990年頃まで低下を続けた。
- 1990年代初期以降については，国内における運転プラント1基当たりの集団線量は横ばいで推移している。
（次スライド参照）



世界の原子力発電所1基当たりの線量の推移（福島第一事故以前）

(出典) 我が国の実用発電用原子炉施設の集団線量の現状と低減化に向けて（2011年1月）

- 原子力発電所では，これまでの運転経験において，種々の線量（線源）低減方策が適用されてきた。
- これまで適用した各種方策例について，
 - 放射能発生抑制
 - 放射能付着/沈積抑制
 - 線源除去
 - 距離/遮蔽の観点で，プラントの**設計**・**建設**・**供用**の各段階における内容を整理した。

プラント設計段階における施策（例）

■ 放射能発生抑制

- ① 復水浄化系二重化
- ② 給水系へのCo基合金代替材適用
- ③ 給水加熱器の十分な前酸化処理

■ 付着/沈積抑制

- ① 配管内面表面処理
- ② CUWポンプの低温域への配置
- ③ 下部ホールの無いLPRMの採用

■ 距離/遮蔽

- ① ドライヤー頂部とRPVフランジ部の水遮蔽厚さ確保
- ② 恒久遮蔽の設置

復水浄化系二重化

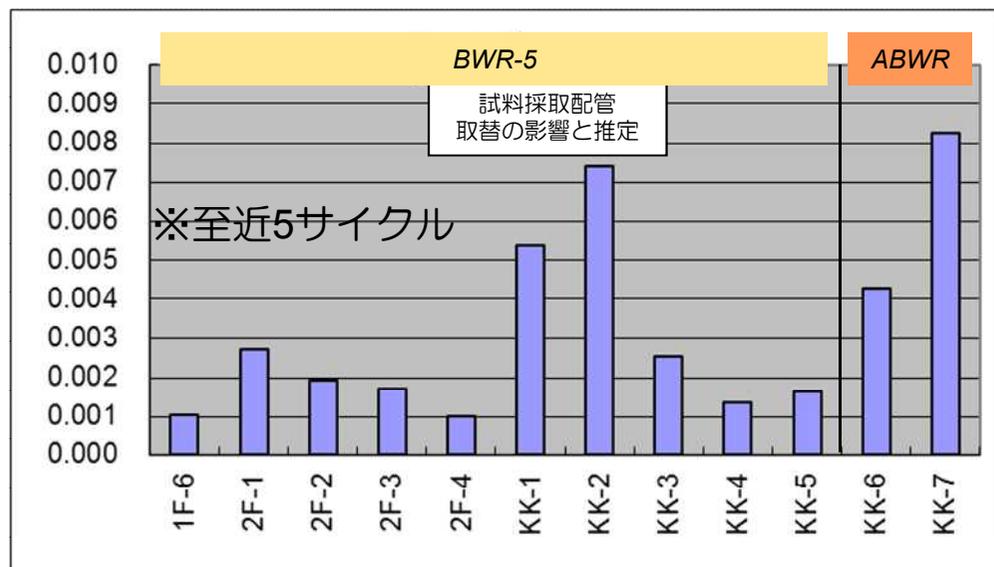
- 改良標準化に伴い、給復水系材質が変更され、原子炉Fe持込量、停止時発生クラッド放射エネルギーは、初期設計プラントに比べ、2～3桁程度低減。
- 場の線量率は約10分の1、作業線量は50%程度低減。
- 復水浄化系二重化による原子炉Fe持込量低減は、作業線量の低減に対して必須。

	初期設計プラント	改良標準化プラント
復水器材料	黄銅製鋼	チタン
給水加熱器ヒート交換機系材料	炭素鋼 (順次、低合金鋼に更新)	低合金鋼
復水浄化系	CD単独	CF/CD
原子炉Fe持込量	数10～1000 kg	1～10 kg
停止時発生クラッド放射エネルギー	10^{12} Bq	10^9 Bq
原子炉ウェル/D/Wハッチ外線量率	～1 mSv/h	0.1 mSv/h
ウェル除染/CRD取外・取付作業線量	概ね50人・mSv前後	概ね20人・mSv前後

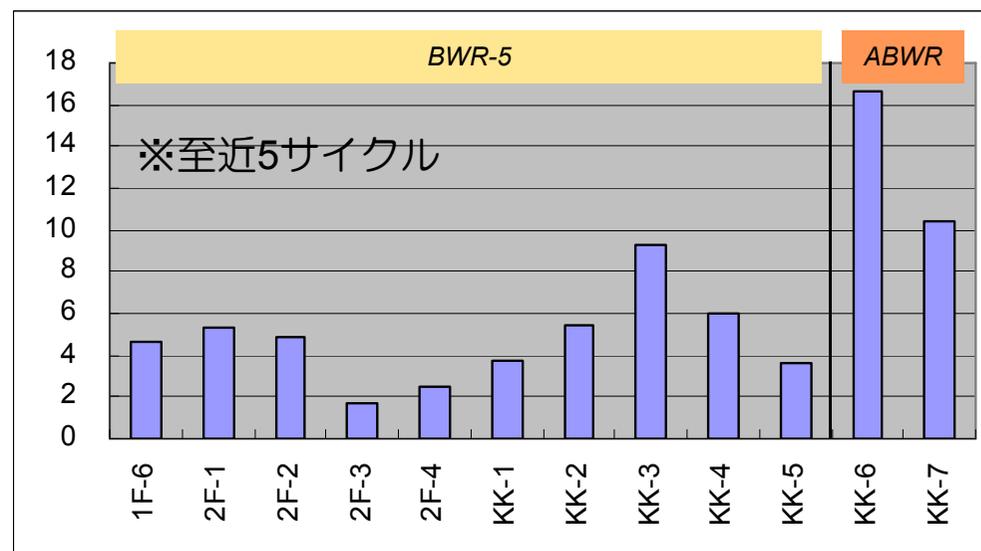
給水系へのCo基合金代替材適用

- 改良標準化以降のプラントにおいても、給水系弁体シート面に対して、Co基合金の適用はほぼ100%。
- Co基合金は剛性/摺動特性に優れ、機能性の観点で信頼度は高い。
- ABWR (KK-6, 7) では、HPDP系ドレン水がCF/CDを介さず直接再給水されるため、給水中Co濃度、原子炉水中Co-60濃度がBWR-5に比べて高い。

給水中Co濃度 (ppb)

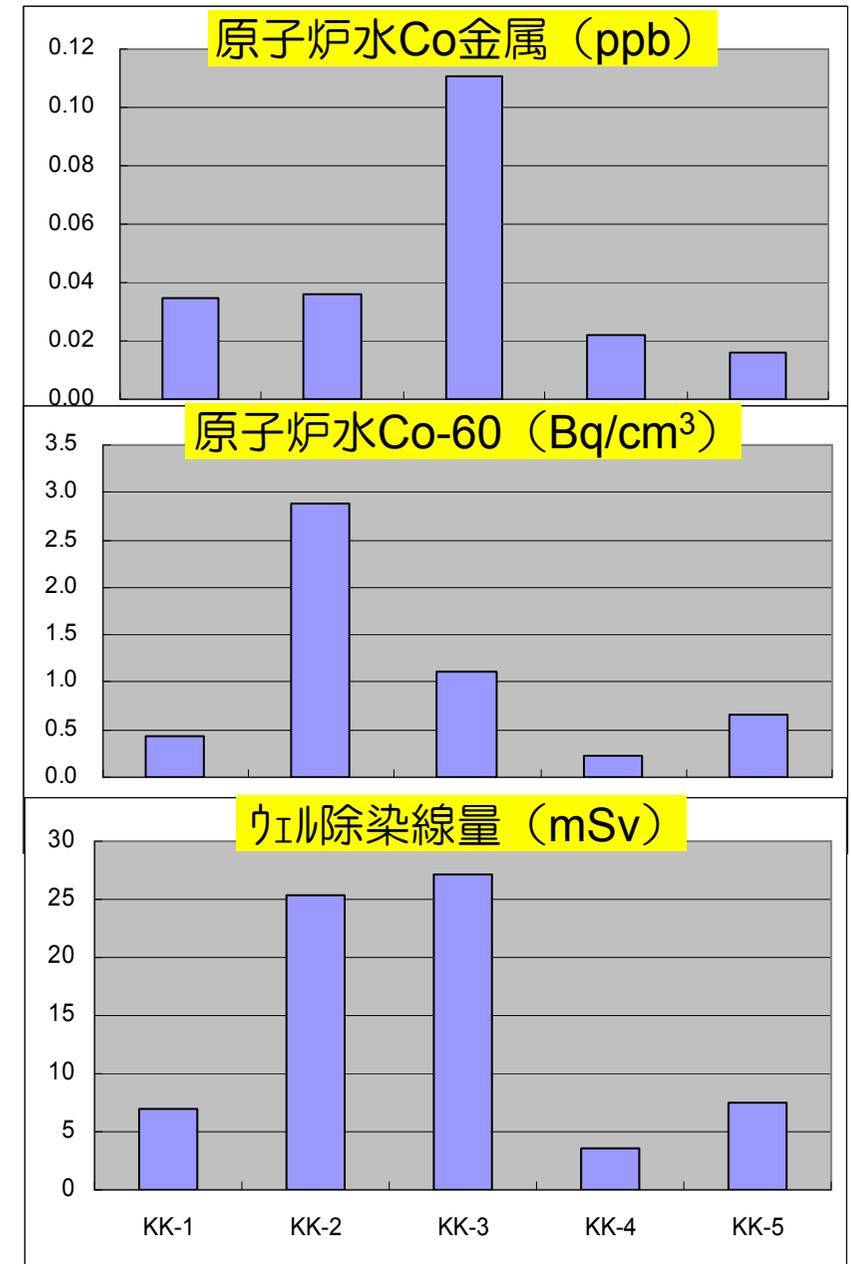


原子炉水中Co-60濃度 (Bq/cm³)



給水系へのCo基合金代替材適用

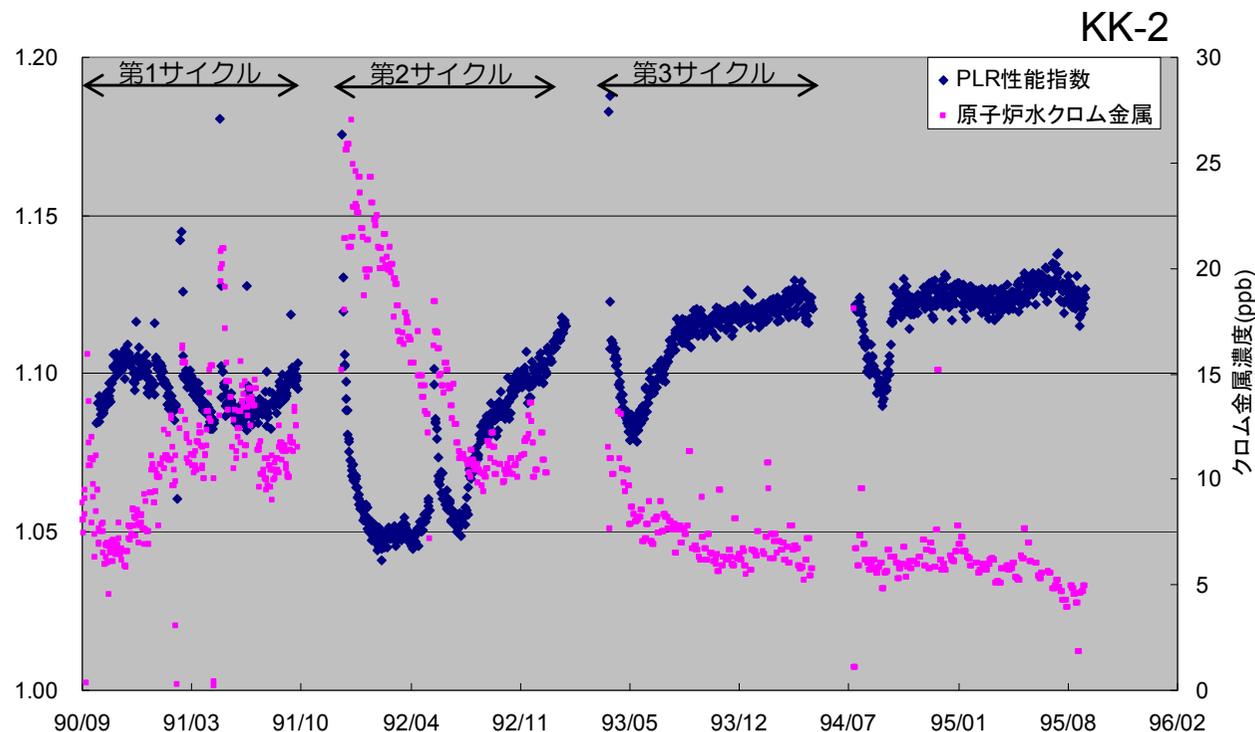
- KK-2, 3では、給水系逆止弁（ステライト）の磨耗損傷により、Co基合金（約200～300g）が原子炉に流入。
- 原子炉水中Co金属及びCo-60が大幅に上昇。
- 更に、原子炉ウェル/DW^hデス列線量率、作業線量が上昇。



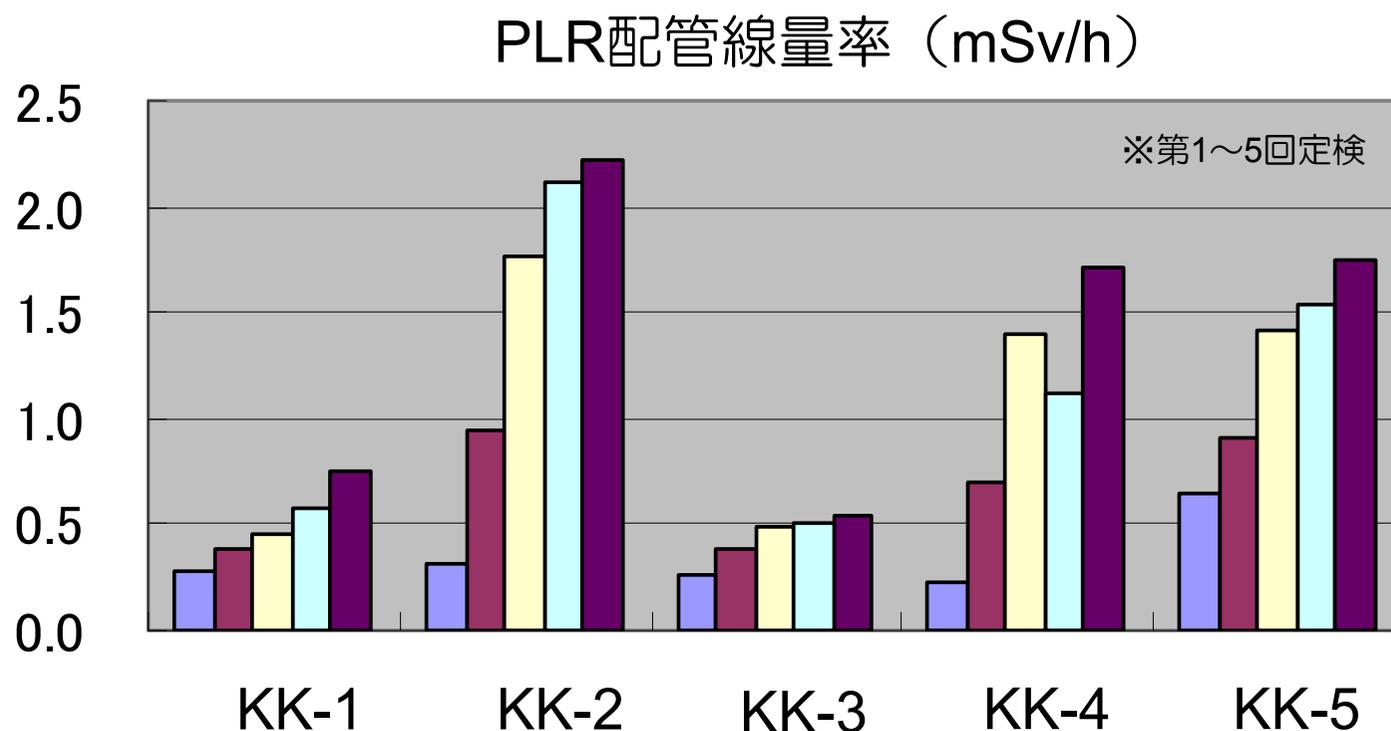
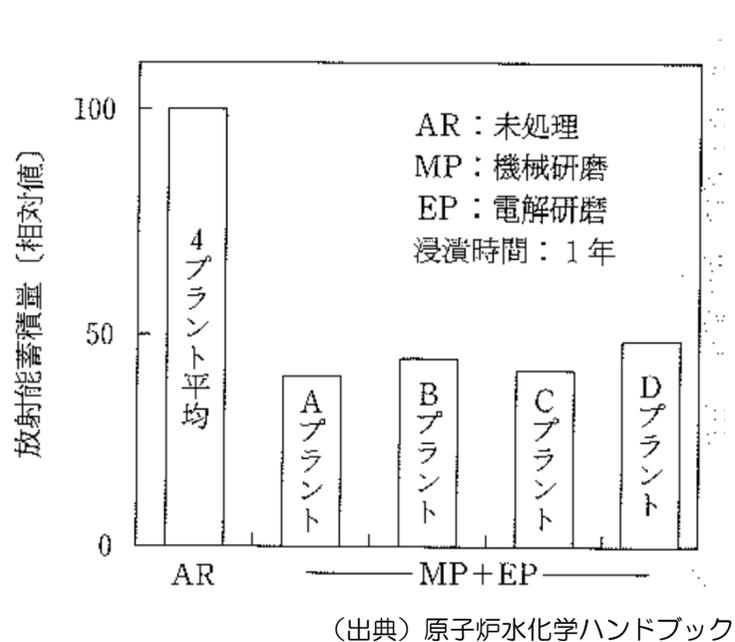
※Co濃度及びCo-60濃度は第1サイクル
※作業線量は第1回定検

給水加熱器の十分な前酸化処理

- KK-2, 3, 6, 7において、運転開始初期、原子炉水中Cr濃度の上昇を確認。
- 給水加熱器伝熱管（ステンレス鋼）からCrが大量に初期溶出し、燃料にCrが付着し、燃料クラッドを溶解。
- これに伴い、原子炉水中放射能濃度、配管線量率、作業線量の上昇に影響と推察。
- 原子炉水中Cr濃度が上昇したことにより、PLR/RIP設備の高速流速部への付着量が増加。同設備の性能が低下。

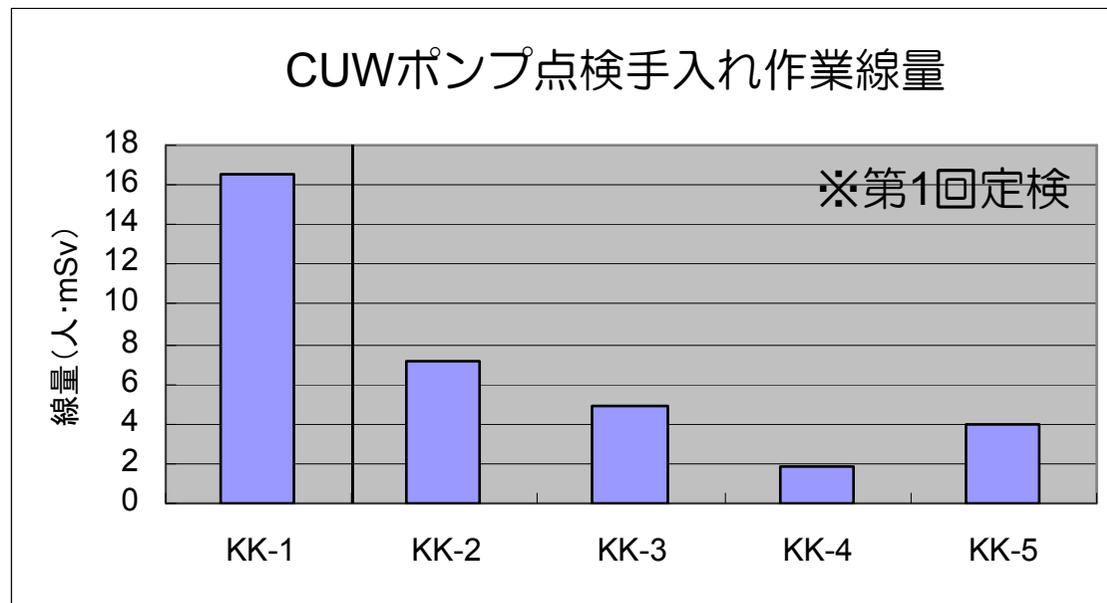
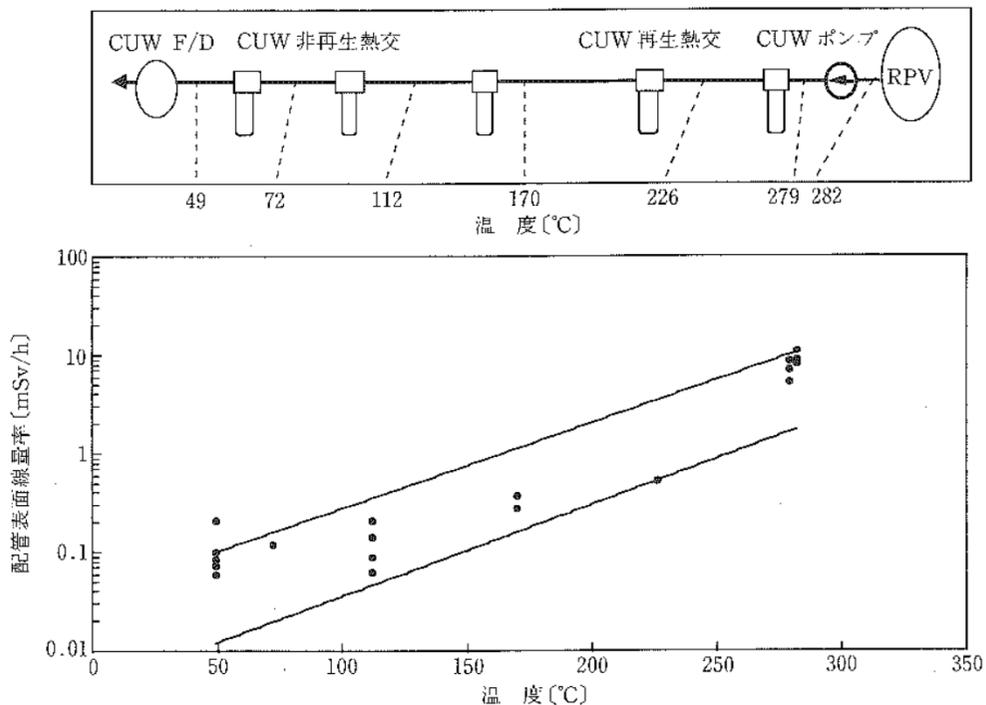


- 国内インプラント試験において配管内面表面平滑化処理は放射線源の付着抑制効果が大きいことを確認。
- KK-2, 3では電解研磨, KK-4, 5では機械研磨をそれぞれ適用。
- 第2サイクル以降は, 建設段階での前酸化処理も重畳。



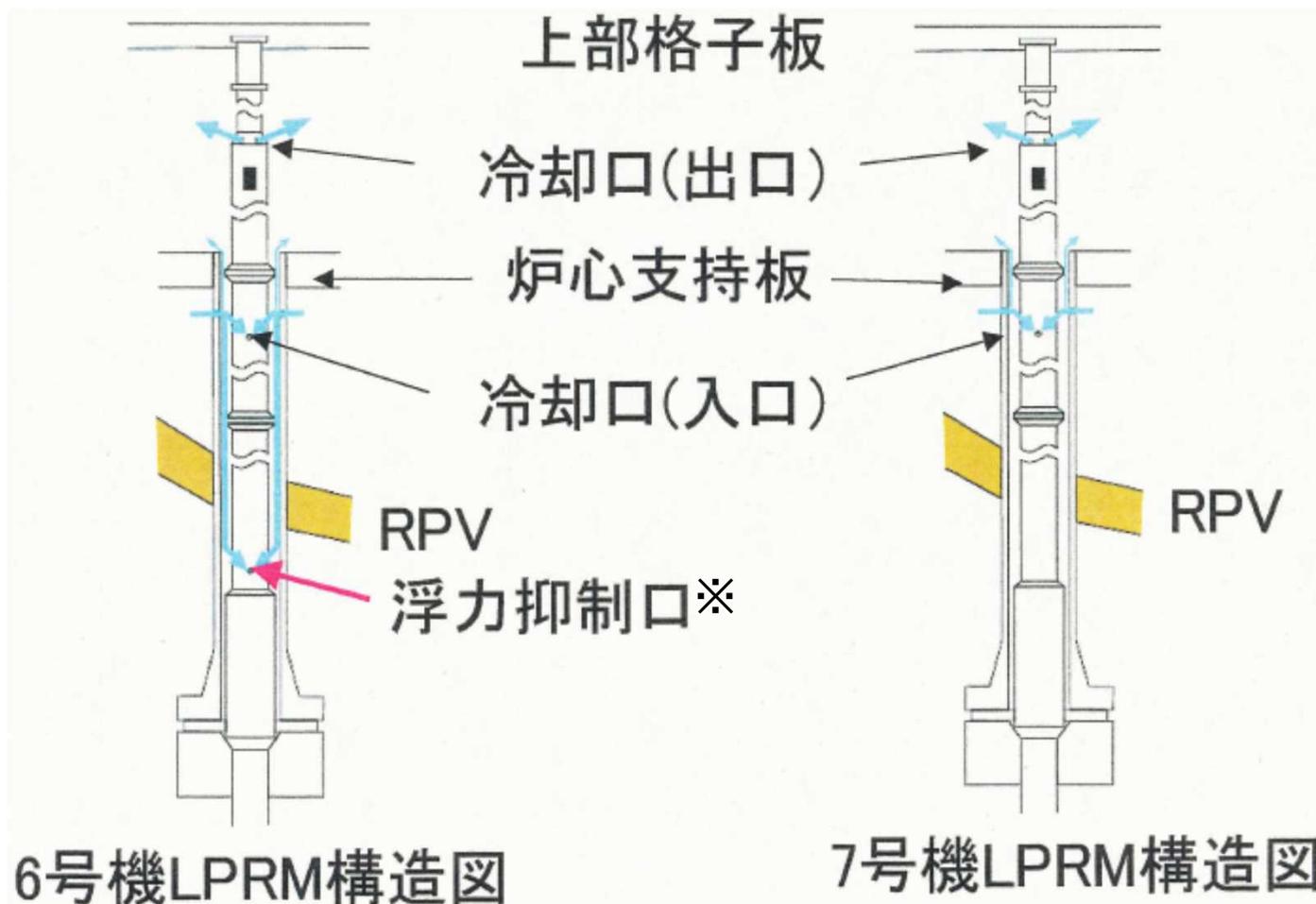
CUWポンプの低温域への配置

- 炭素鋼配管の腐食速度は流体温度に依存。
- 配管線量率は，低温域（非再生熱交出口：約50℃，約0.1mSv/h）から高温域（再生熱交入口：約220℃，約1mSv/h）に向かって増加。
- KK-2以降のプラントでは，ポンプの配置を再生熱交入口側から非再生熱交出口側に変更。
- ポンプ点検手入りに係る作業線量を低減。



下部ホールの無いLPRMの採用

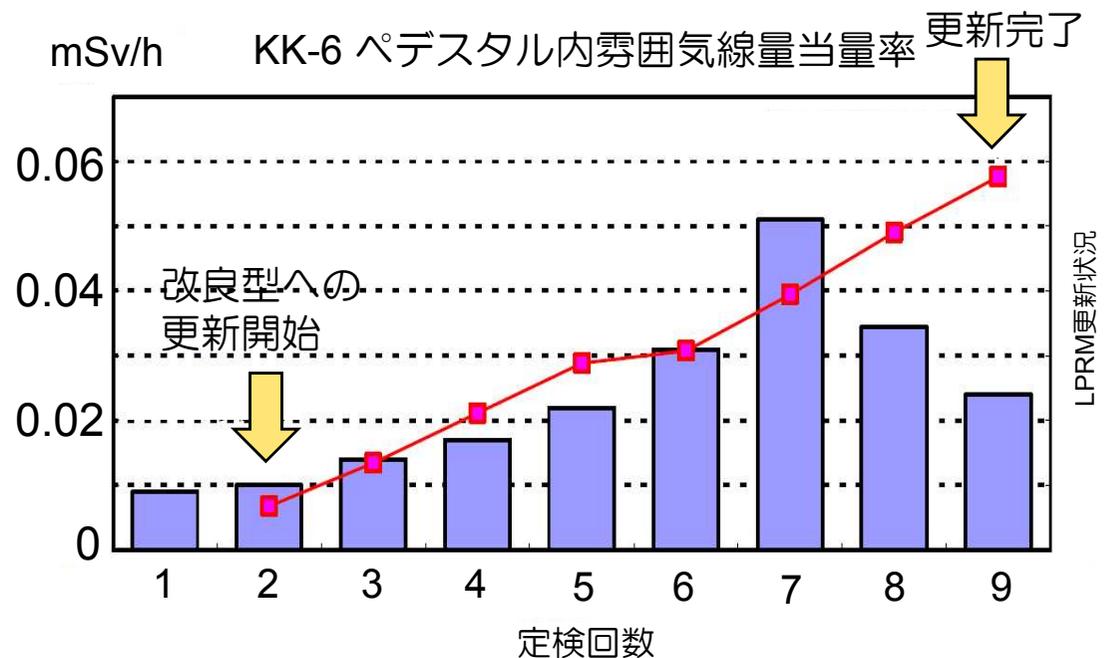
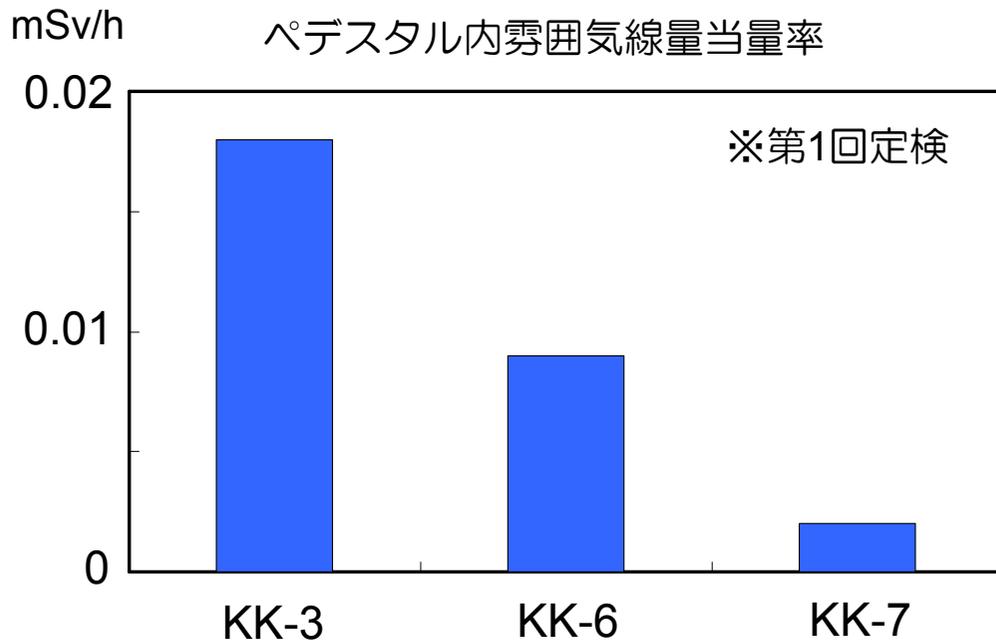
- KK-6 LPRM（従来型）；下部ホールがある
- KK-7 LPRM（改良型）；下部ホールが無い



※LPRM炉内装荷時の浮力抑制が目的。KK-6起動試験における知見を踏まえ、LPRMハウジング温度の低減及び表面線量率の低減のため、KK-7では下部の冷却孔を塞ぐ改造を実施。

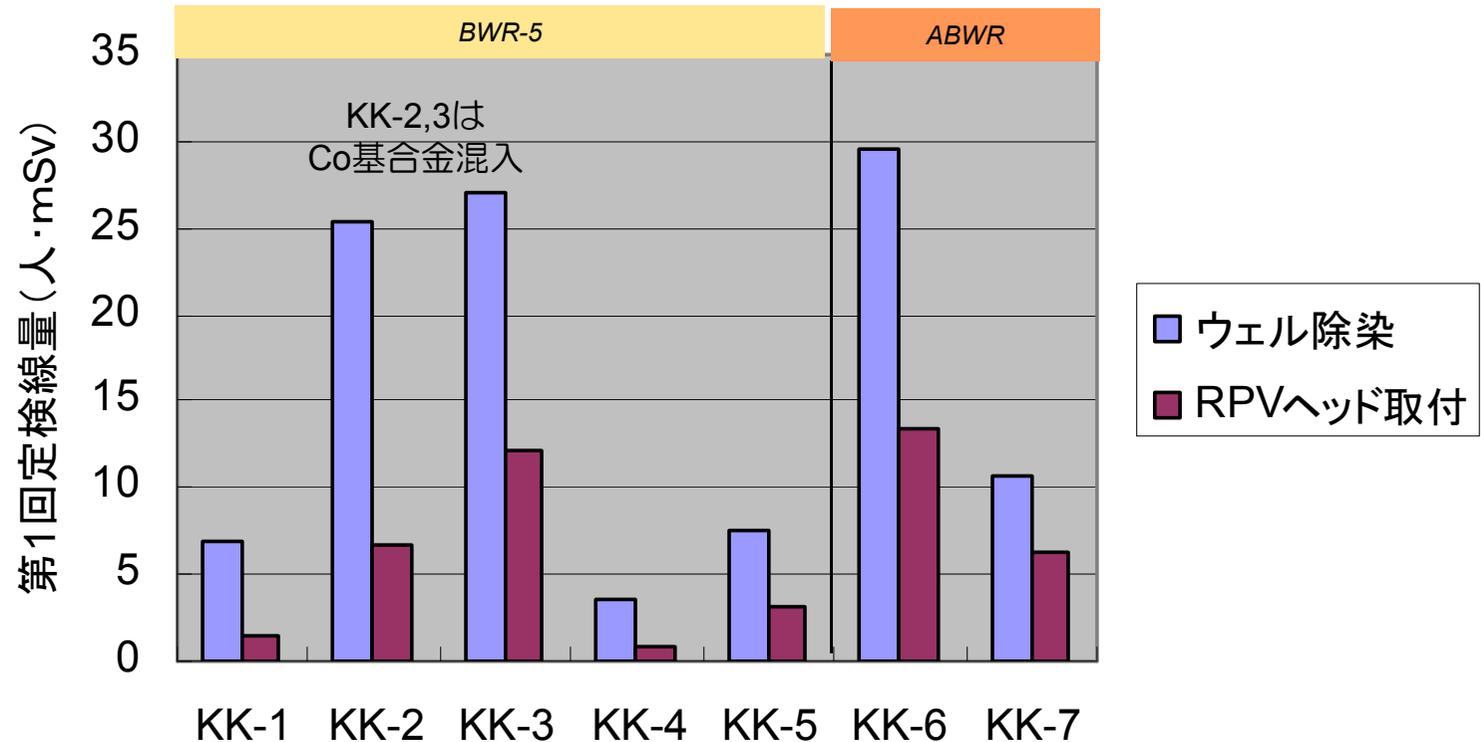
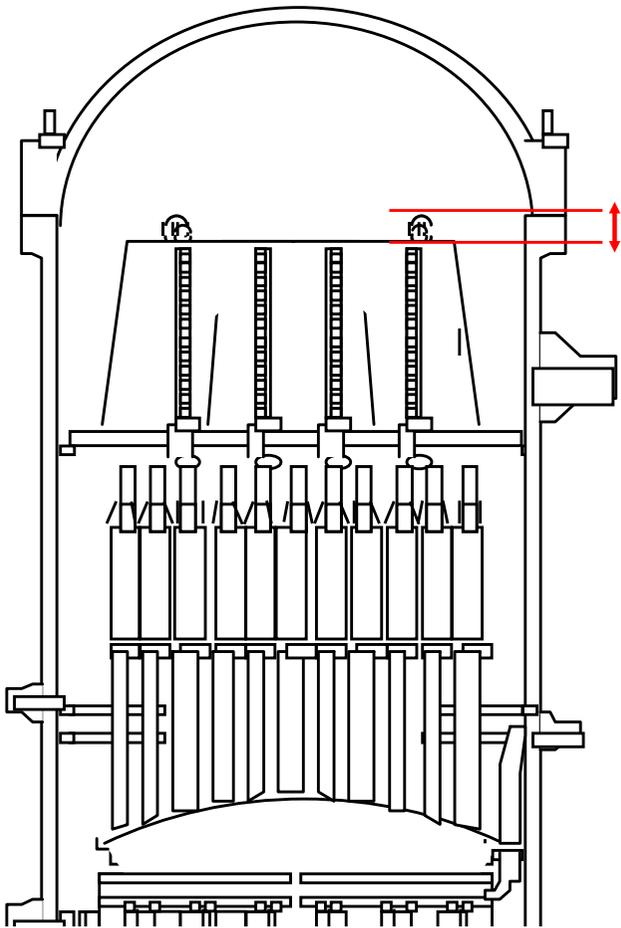
下部ホールの無いLPRMの採用

- ペDESTAL内の雰囲気線量当量率はKK-7に比べてKK-6が高い。
- KK-6 ICMハウジング内部（ステンレス鋼）には原子炉冷却材が流れて放射性物質が付着・蓄積してペDESTALの線源となり作業線量に影響と推定。
- KK-7は下部での原子炉冷却材の流れが殆ど無いため、線源にならない。
- KK-6では改良型への更新を完了し、線量率が低下傾向。



ドライヤー頂部とRPVフランジ部の水遮蔽厚さ確保

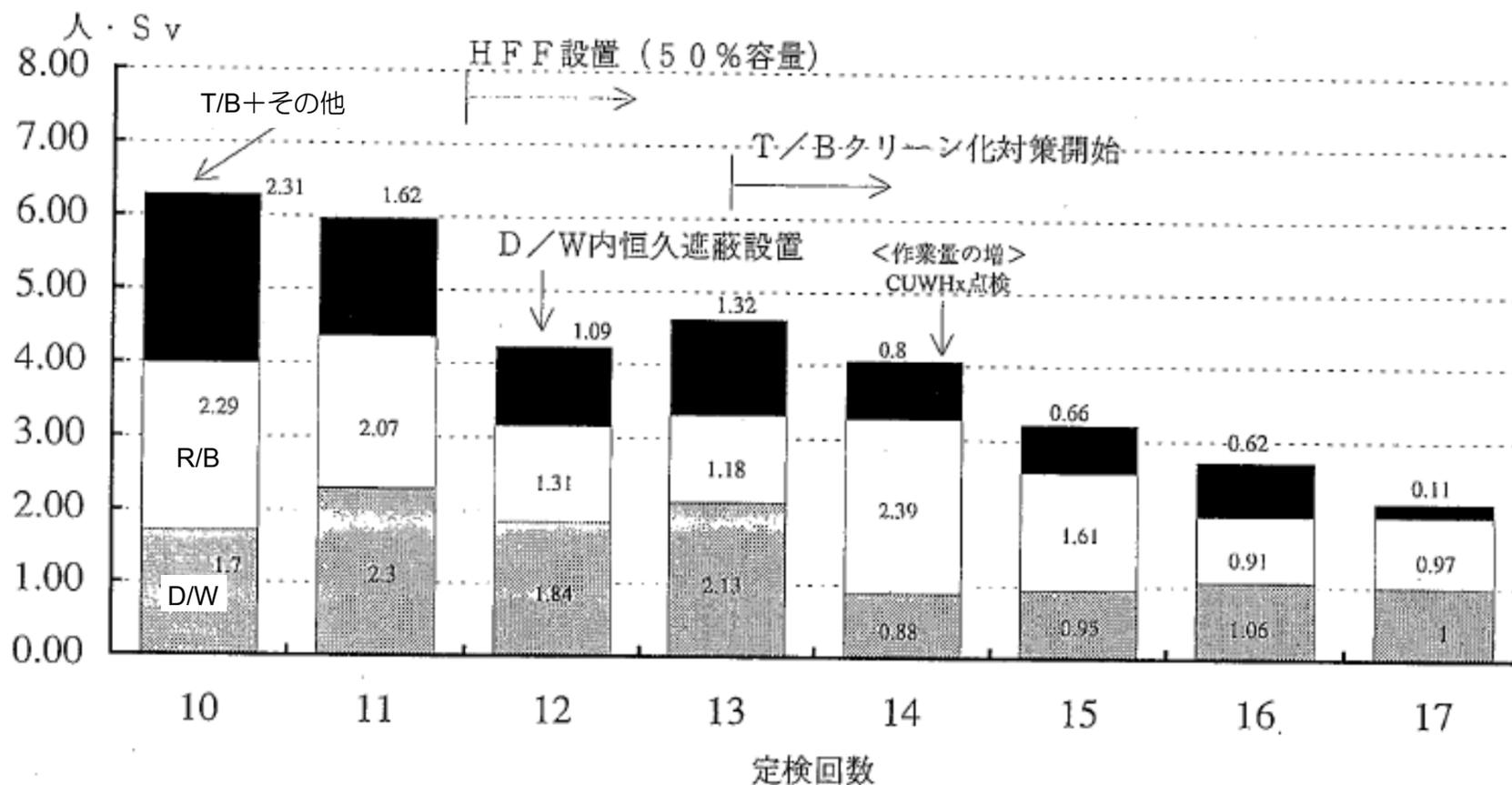
- ドライヤー頂部とRPVフランジ部の位置関係は、BWR-5：約540mm，ABWR：約180mm。
- ドライヤーからの放射線を水遮蔽で減弱させる効果が小さく，ウェル除染やRPVヘッド取付の作業線量が増加。



恒久遮蔽の設置

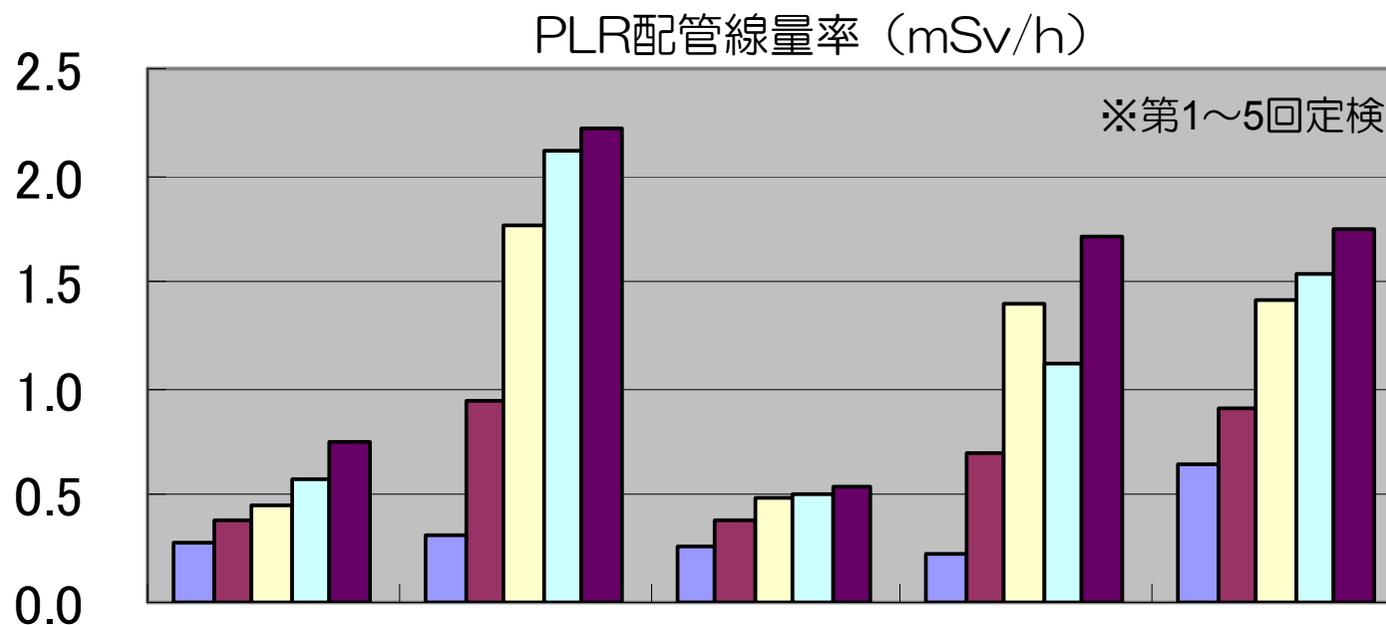
- 1Fでは、線量低減対策として、D/W内原子炉一次系配管を対象に恒久遮蔽を追設。
- D/W作業線量を低減。

1F-1通常定検分線量建屋別内訳



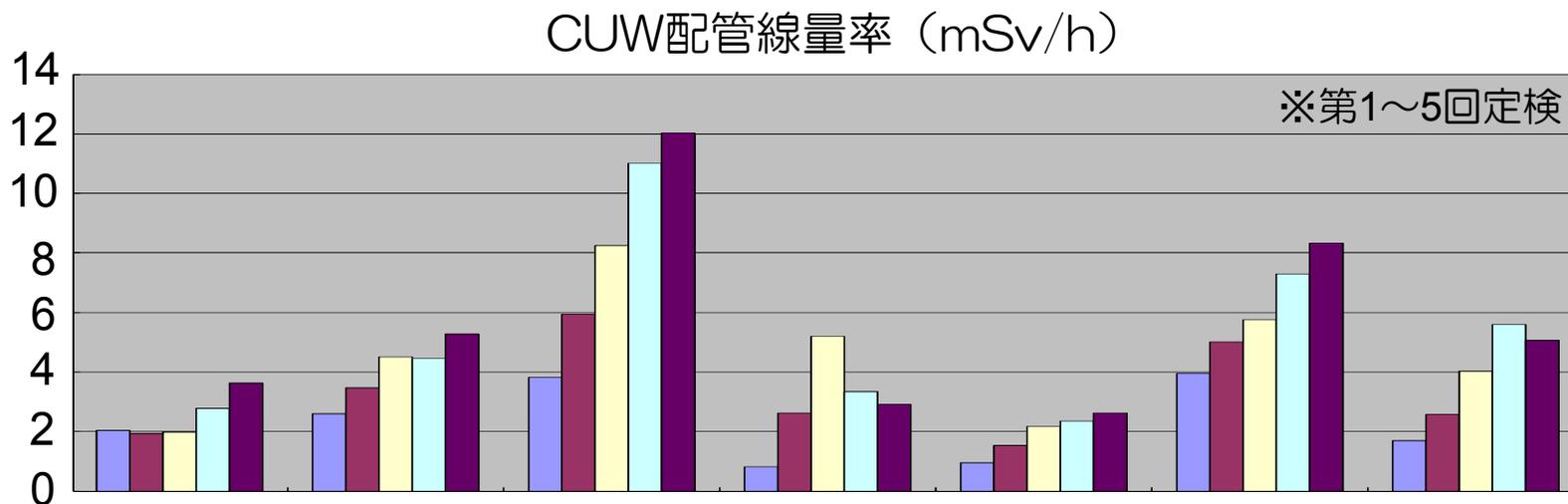
- 放射能発生抑制
- 付着抑制
 - ① 原子炉一次系配管のプレフィルミング

- KK-3 PLR配管線量率は低いレベルで推移。
- 建設段階に高溶存酸素条件で十分な前酸化処理が行われ、緻密な酸化被膜が形成された効果と推定。
- KK-1は1mSv/h以下で推移していたが、水素注入適用以降、線量率の上昇傾向を確認。



P/F	KK-1	KK-2	KK-3	KK-4	KK-5
時間(hr)	260	700	90	860	380
DO(ppb)	350	160	3~4 ppm	160~200	80~170
pH	7	6.7	6	6.7	8.0~8.5
配管内面	—	電解研磨	電解研磨	機械研磨	機械研磨

- KK-3 CUW配管線量率は高いレベルで推移。
- 建設段階に，ステンレス鋼内面とは対照的に，炭素鋼内面ではDO濃度が高過ぎ，配管内表面に肌荒れが生じ，Co-60が取り込まれ易くなったと推定。
- KK-5は低いレベルで推移。
- アルカリプレフィリングを実施し，酸化被膜の緻密化がステンレス鋼と比べ大きかったものと推定。



P/F	KK-1	KK-2	KK-3	KK-4	KK-5	KK-6	KK-7
時間(hr)	260	700	90	860	380	216	89
DO(ppb)	350	160	3~4 ppm	160~200	80~170	155	550
pH	7	6.7	6	6.7	8.0~8.5	6.5	8.0~8.5

※KK-6, 7：核加熱時にNiイオン注入も実施

■ 放射能発生抑制

- ① 燃料クラッドからの剥離抑制

■ 付着／沈積抑制

- ① 放射能インベントリー低減
- ② SHC低温投入

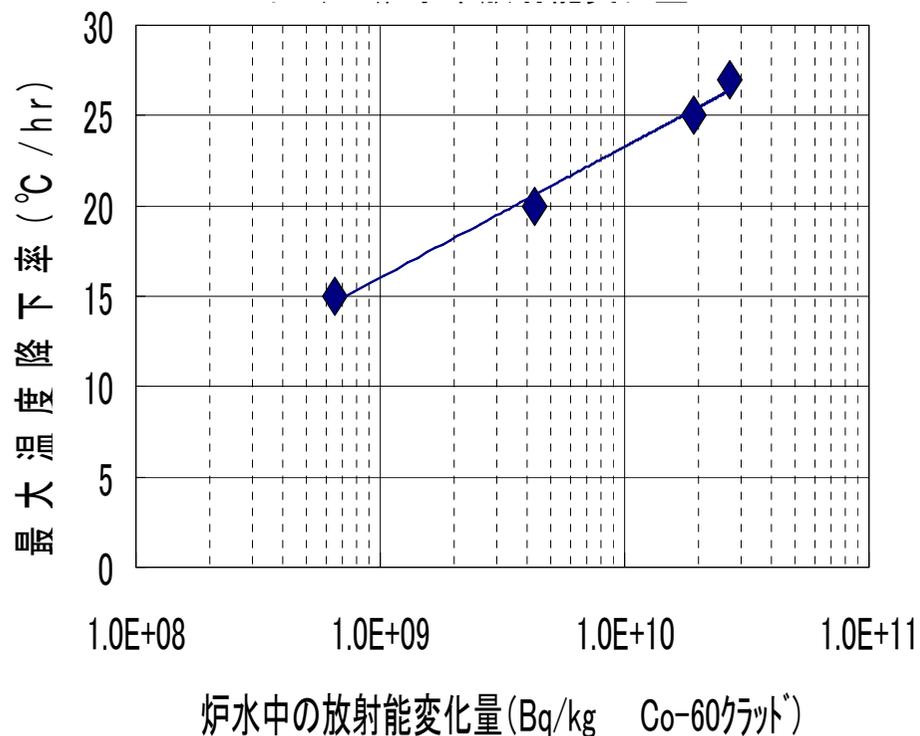
■ 線源除去

- ① 系統除染

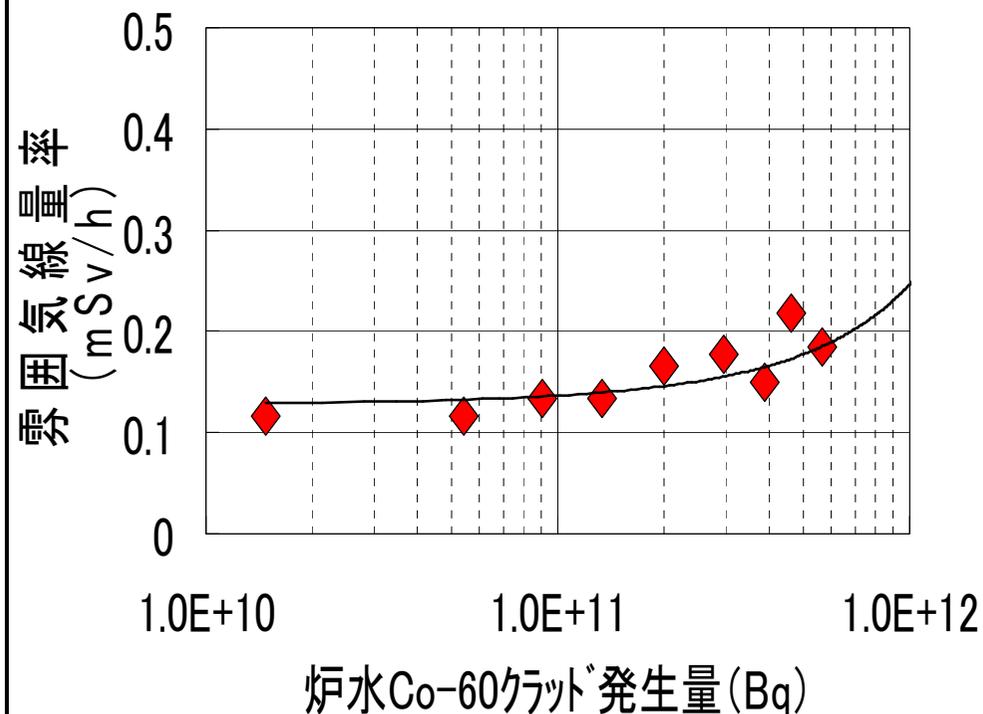
燃料クラッドからの剥離抑制

- 1FはCF部分浄化であり，給水Fe濃度が高く，原子炉内Fe持込量が多い。
- プラント停止操作において，原子炉水中の発生クラッド放射能量は，温度低下率により大きく変化。
- 発生クラッド放射能量の増加は，D/W内一次系配管等への付着や堆積に伴い，作業エリアの雰囲気線量率の上昇に寄与。

1F-2～5停止時Co-60クラッド発生量と炉水温度低下率（最大）

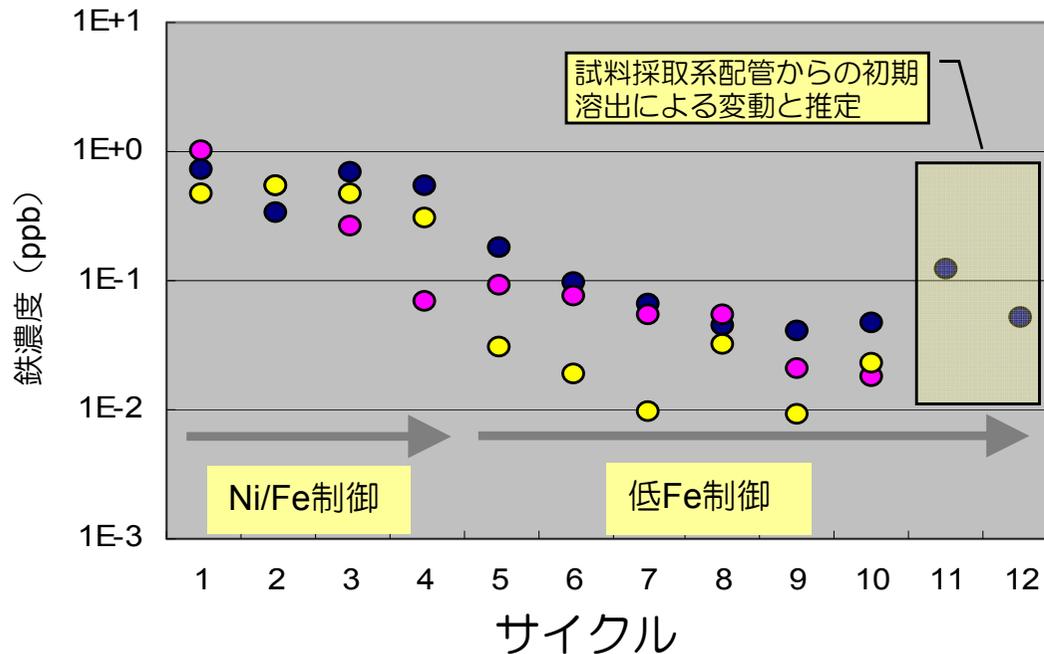
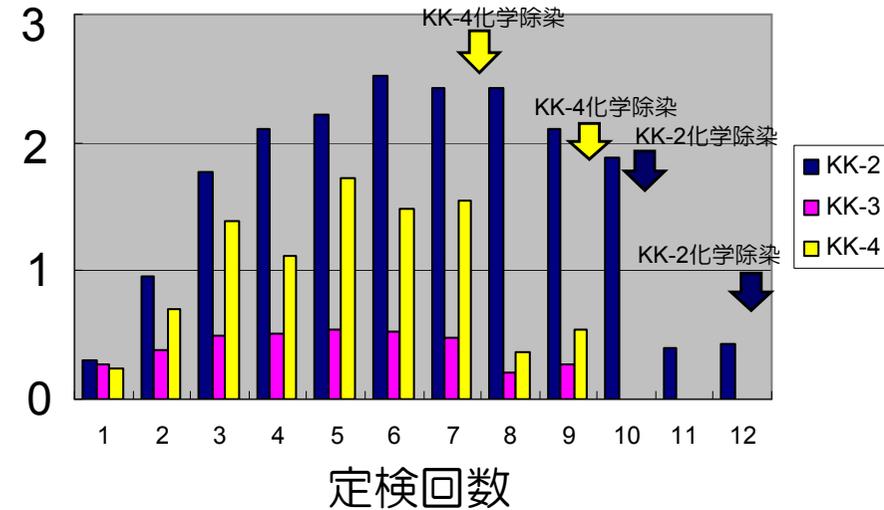


1F-4停止時Co-60クラッド発生量とD/W全体雰囲気線量率（平均）

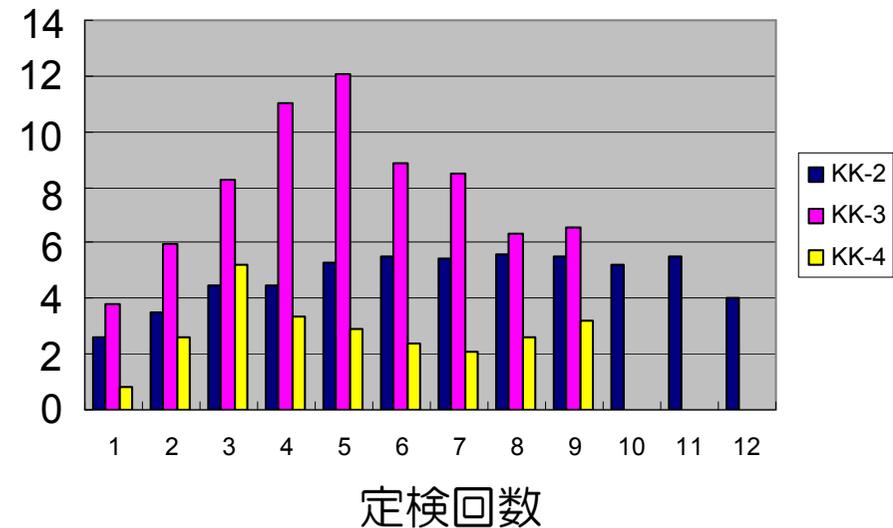


- KK-2, 3, 4は、平衡炉心以降、Ni/Fe制御から低Fe制御へ移行。
- CF：100%供用，給水Fe濃度：0.1ppb以下にて運用。
- PLR，CUW配管線量率は漸減。
- FeクラッドがCo-60付着挙動に影響。
- 適切なタイミングでの制御方法の切り替えが重要。

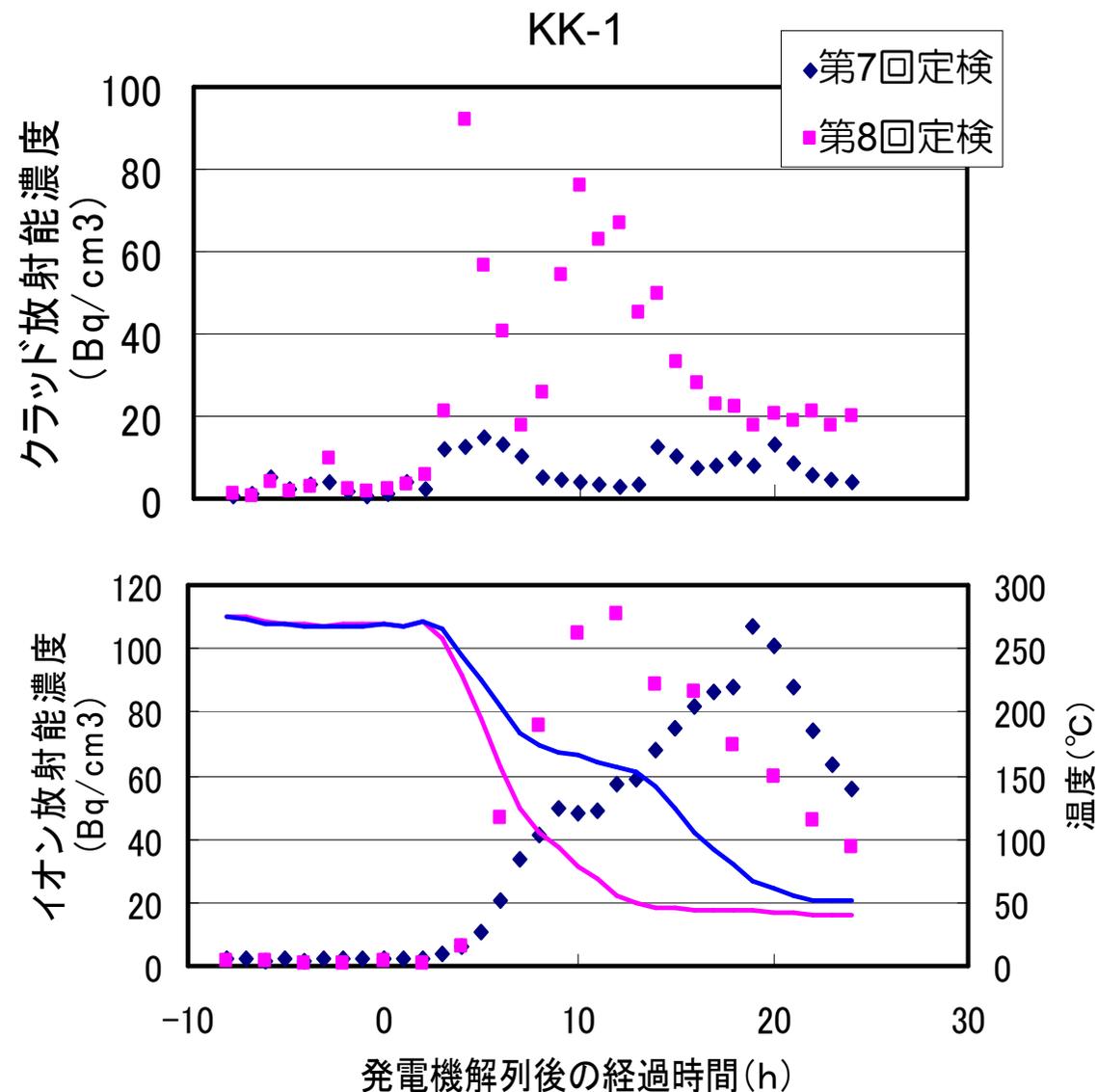
PLR配管線量率 (mSv/h)



CUW配管線量率 (mSv/h)



- KK-1では，第8回定検（1996年1月）より，原子炉停止時の原子炉除熱方法を改良。
- 復水器を真空に保ちながらタービンバイパス弁を開き，原子炉内の残留熱を蒸気とともにタービン側へ逃がすことで，原子炉の降温率を高め，停止操作時間を短縮。
- 従来150～160℃付近でSHCを投入していたが，約100～110℃付近に変更。
- 温度低下率上昇に伴い，Co-60クラッドスパイク上昇。
- イオンスパイクは変化なし。

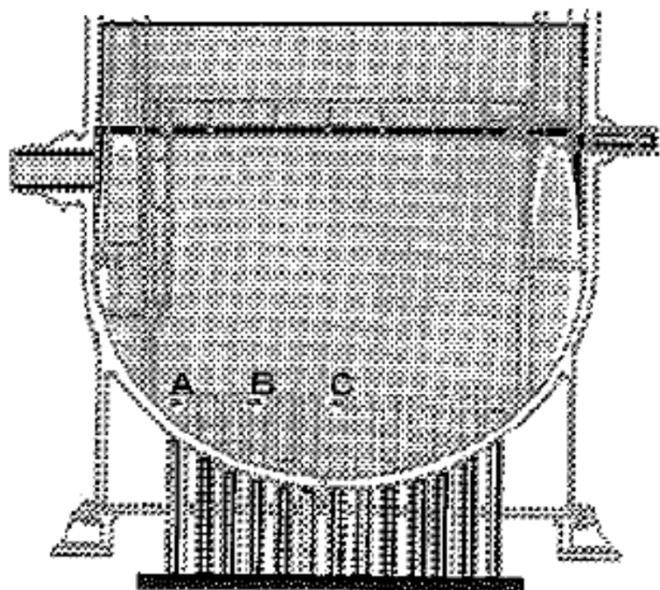


SHC低温投入

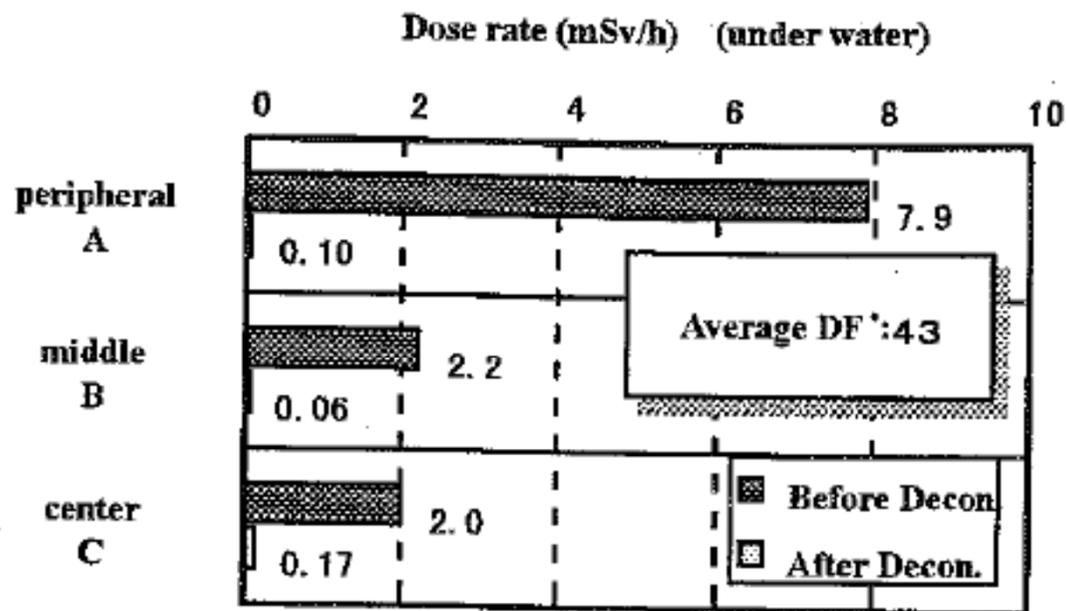
- KK-1 第7回定検までは、SHC投入の都度、RHR配管線量率の上昇量が大きい。
- 第8回定検以降、投入温度の低下に伴い、線量率の上昇量は縮小傾向。
- KK-2, KK-5も同様の傾向。

プラント	定検	SHC 投入温度	RHR配管線量率 (mSv/h)		
			SHC投入前 (A)	SHC投入後 (B)	上昇量 (B)-(A)
KK-1	第7回	153℃	0.48	1.2	0.72
	第8回	100℃	0.33	0.41	0.08
	第9回	100℃	0.15	0.2	0.05
KK-2	第4回	159℃	0.09	0.48	0.39
	第5回	105℃	0.08	0.21	0.13
KK-5	第4回	155℃	0.95	1.4	0.45
	第5回	100℃	0.1	0.36	0.26

- 1Fでは、炉内構成材料の取替に伴い、化学除染を実施。
- 1F-3では、炉底部線量率を大幅に低減。



Radiation monitors
inside CRD housing



* DF : Decontamination Factor

(出典) Operational Experience of the Japanese BWRs Water Chemistry, Seminar on Water Chemistry of Nuclear Reactors Systems '99 (1999)

- BWRプラントでは、腐食環境の緩和や放射線源の低減を目的として、水素注入，貴金属注入，亜鉛注入など，種々の技術を組み合わせて管理を行い，知見を蓄積してきた。
- 近年，酸化チタンなどの新たな技術も実機へ適用されている。
- 多様化する環境において，更なる線源低減を指向するには，放射線源の挙動に及ぼす影響を予め検討・把握することが益々重要である。

End of Presentation