

加速器を用いた 水化学研究施設の提案

東京大学工学系研究科
勝村庸介

発表内容

1. 水化学ロードマップと放射線効果
2. 放射線場腐食実験の一例
3. 加速器を用いた照射実験施設提案
 - ・ 原子炉実験と加速器実験
 - ・ 電子線とガンマ線
 - ・ 施設概要
 - ・ 設計の問題点
4. 今後の展望

水化学ロードマップと放射線効果

水化学ロードマップ 5 章 1-2

5.1 共通基盤技術に係わるロードマップ

(2) 戦略的シナリオ

原子炉冷却水における特殊環境である放射線の直接あるいは間接照射が腐食環境に与える影響を定量化し、実験室での再現実験を可能とする技術の確立を急務とする。腐食環境の定量化は理論的な評価、すなわち、ラジオリシスモデルによる評価と、高温水化学センサを用いた実験的な評価、を両輪として、展開する。腐食環境が材料に及ぼす影響評価は、材料と水の境界に位置する酸化皮膜の挙動、特性評価を通して、主に水側からアプローチする。また、相互作用の結果生成する腐食生成物の材料表面への析出過程を解明すると共に、析出物に腐食の及ぼす、主として間接的な影響を評価する。上記、技術を確立し、材料と水化学の相互作用の再現実験、加速実験技術を確立して、線量低減、構成材料及び燃料健全性の維持・向上ならびに放射性廃棄物発生量の低減のための技術開発に資する。

放射線場腐食実験の一例

革新的原子力システム技術開発事業

放射線環境下の 超臨界圧水化学に関する技術開発

平成14年 - 18年 (5年間)

総括代表者氏名

勝村庸介 (東京大学大学院)

超臨界水の放射線分解解明

連携機関代表者

木内清 (日本原子力研究所)

材料 - 水界面現象に及ぼす放射線効果

堂前雅史 (電力中央研究所)

腐食環境モニタリングと腐食挙動モデル化

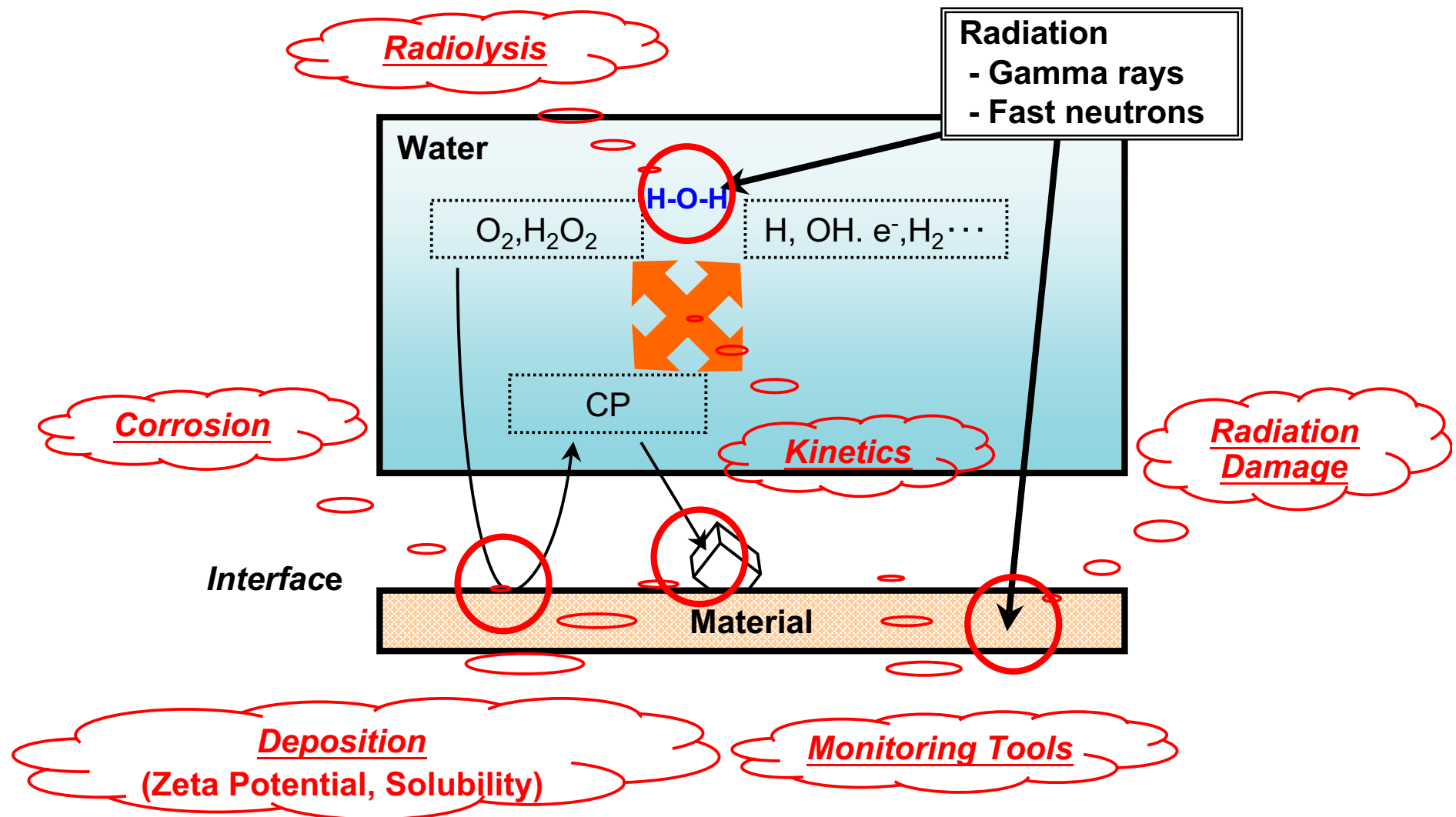
唐澤英年 (日立製作所)

材料 - 水界面現象に及ぼす放射線効果

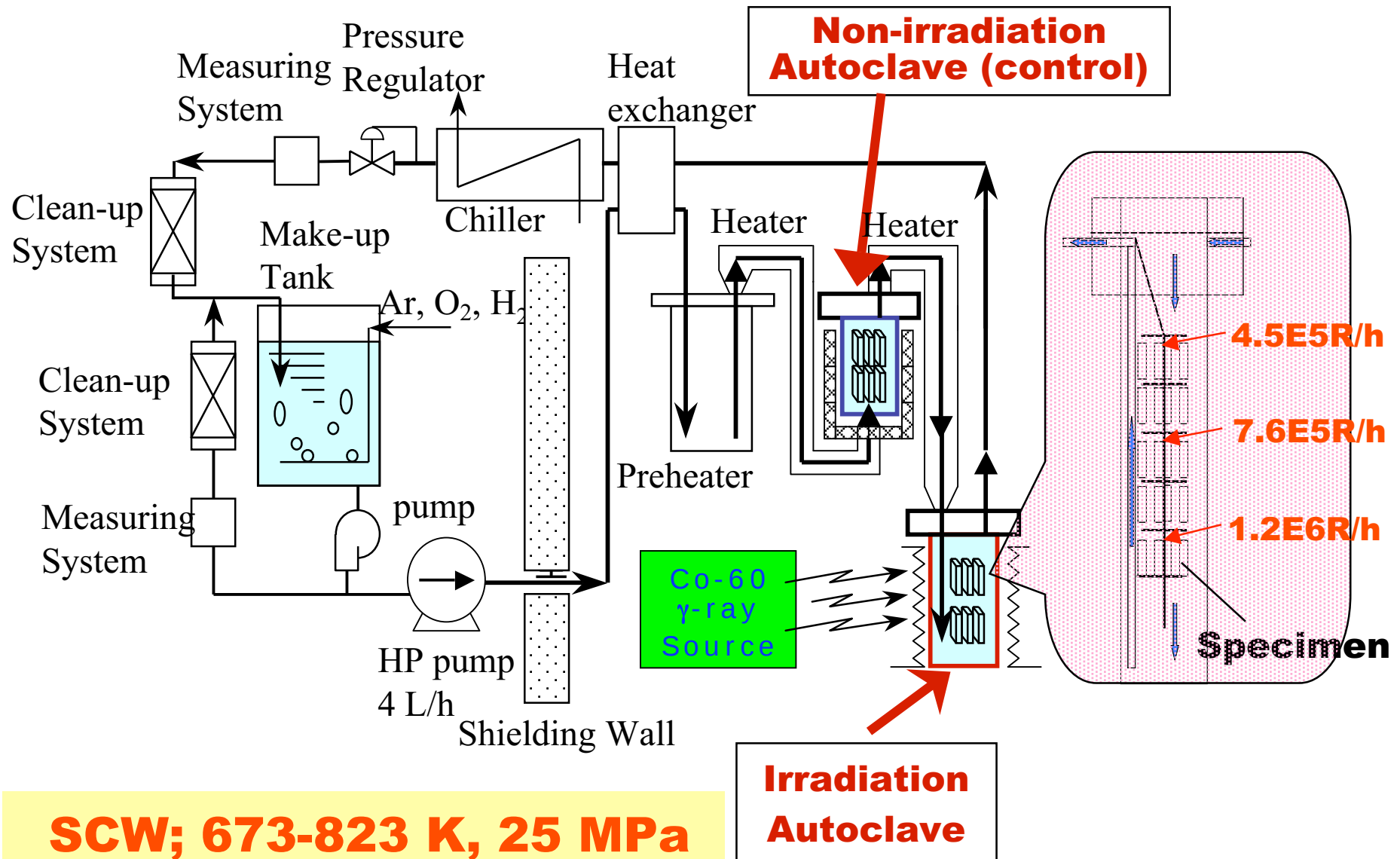
四柳 端 (東芝)

腐食環境モニタリングと腐食挙動モデル化

R&D items of SCW chemistry under radiation field

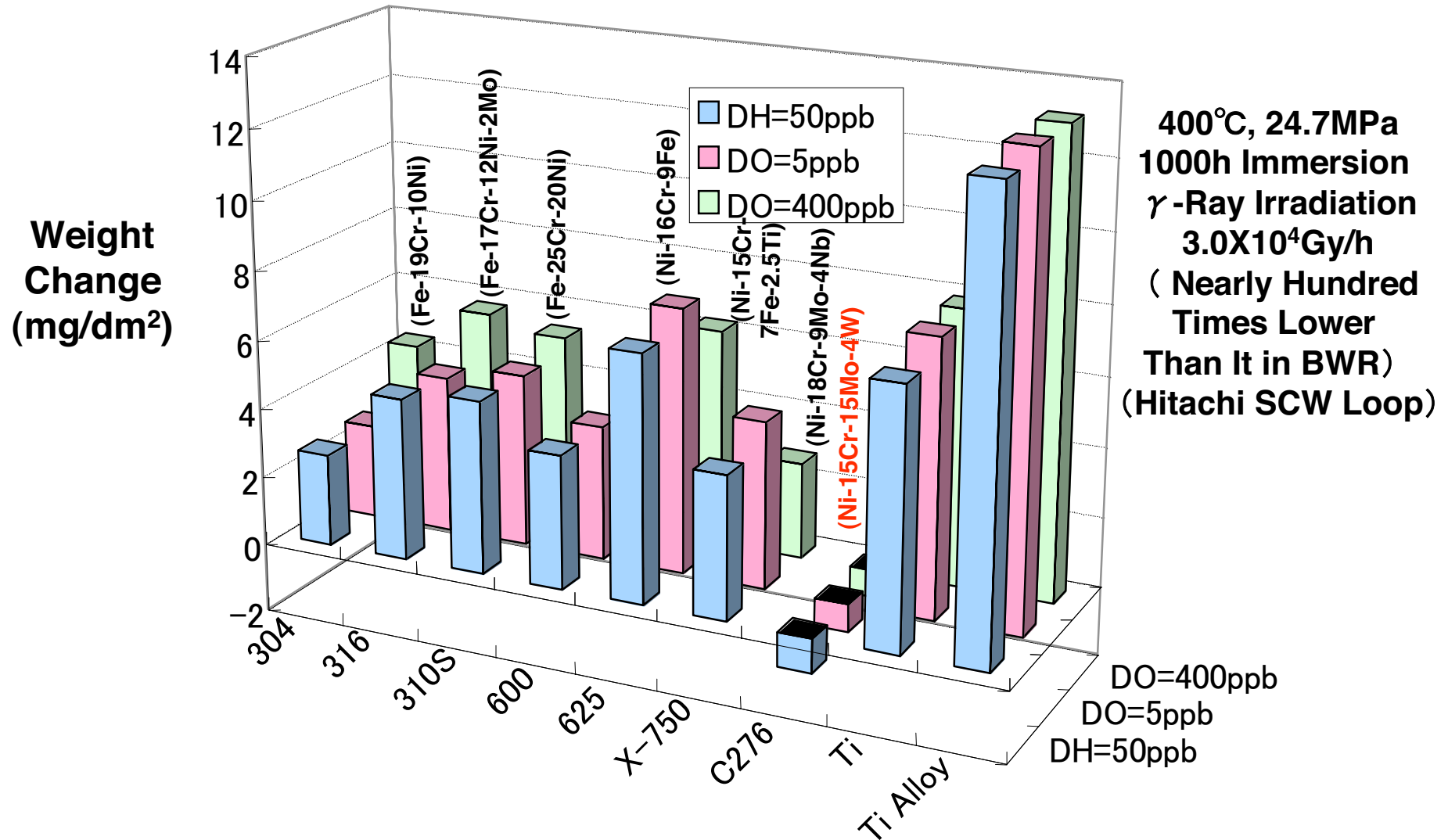


ガンマ線照射下腐食実験



Uniform corrosion in SCW under γ - irradiation

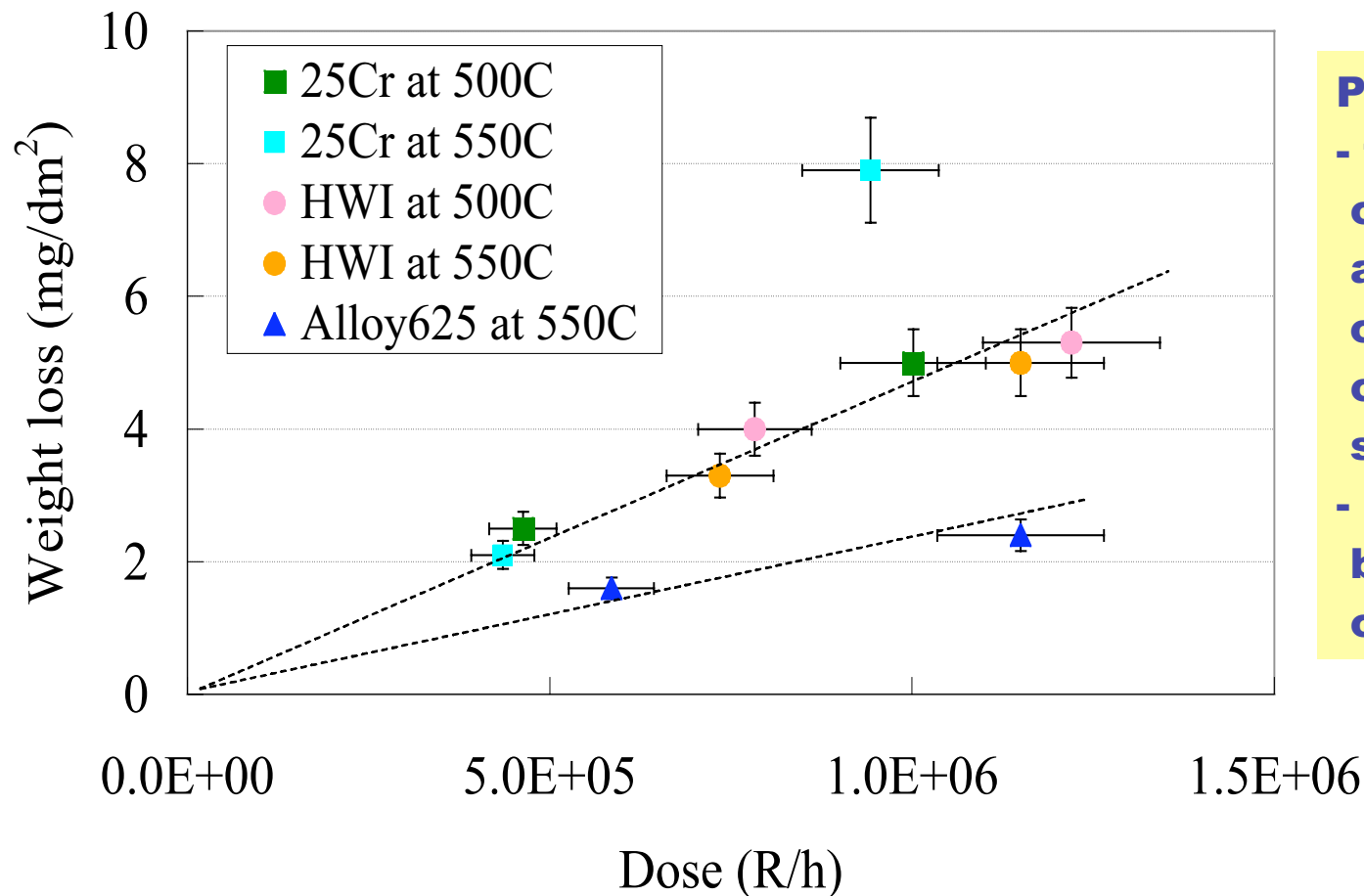
DH and DO Have Not Important Roles in Uniform Corrosion In SCW, Because of High Temperature Oxidation Control. Metal Loss In Hastelloy Is Interpretted to Be Evaporation of Mo by Forming Volatile Oxides (MoO_3)_x on Surfaces .



Dose Dependence

(after 1,000h exposure)

Irradiation effect on weight loss ; increase with dose and independence on temperature, but increase rapidly with dose for 25Cr35Ni0.2Ti at 550°C.



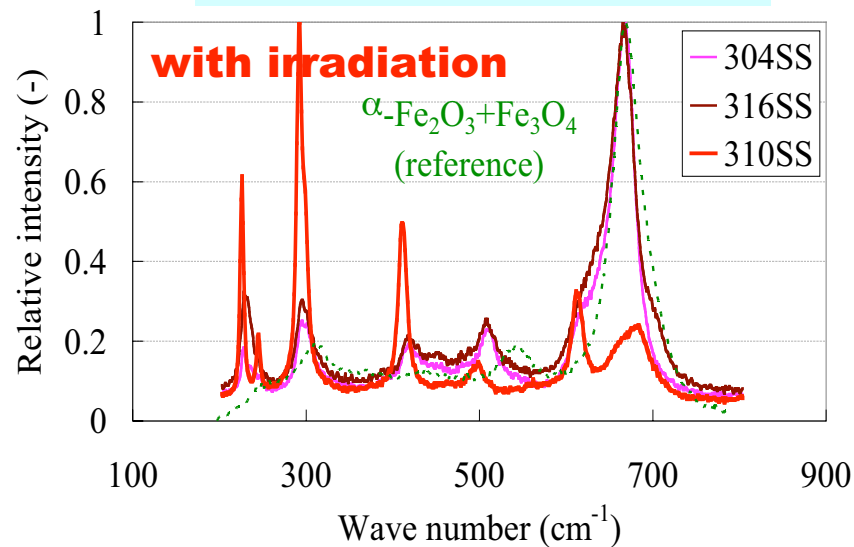
Possible mechanism;

- formation of strong oxidizer such as O atoms by radiolysis of adsorbed water on the surface of specimens
- dissolution of Cr₂O₃ by the reaction of the oxidizer

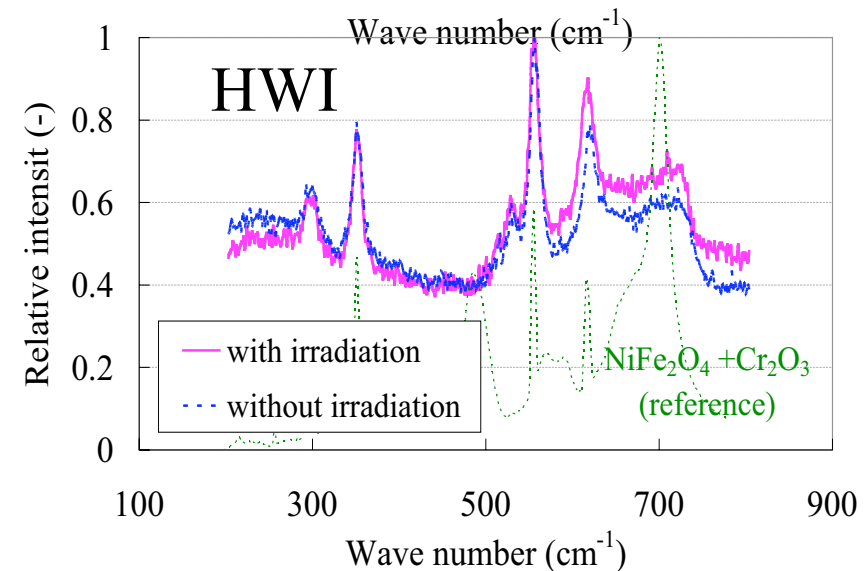
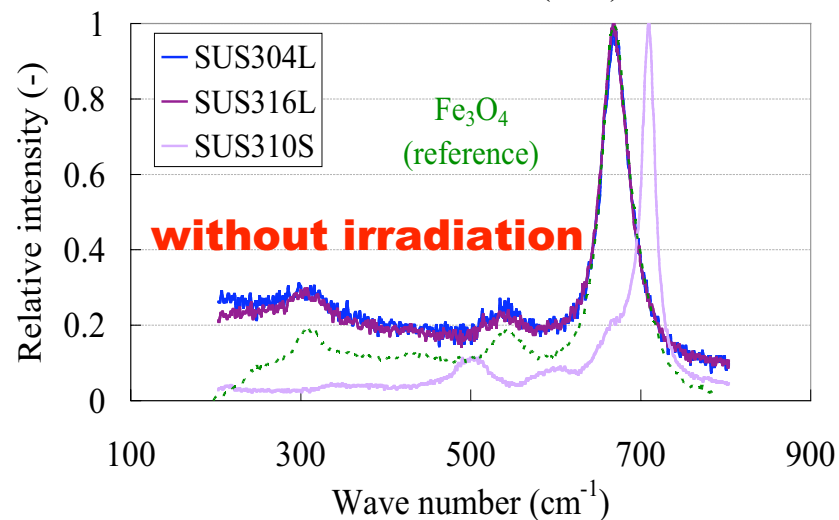
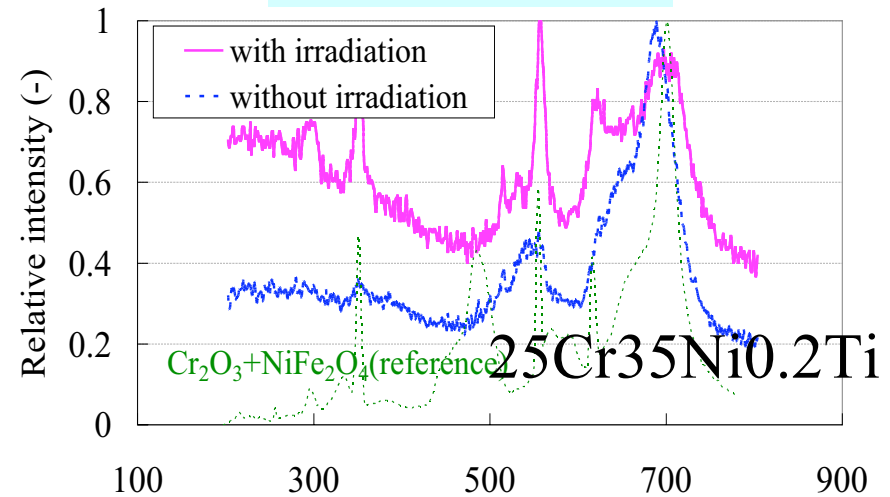
Raman Spectroscopy

(550°C, after 1,000h)

α -Fe₂O₃ formation



Cr₂O₃ formation



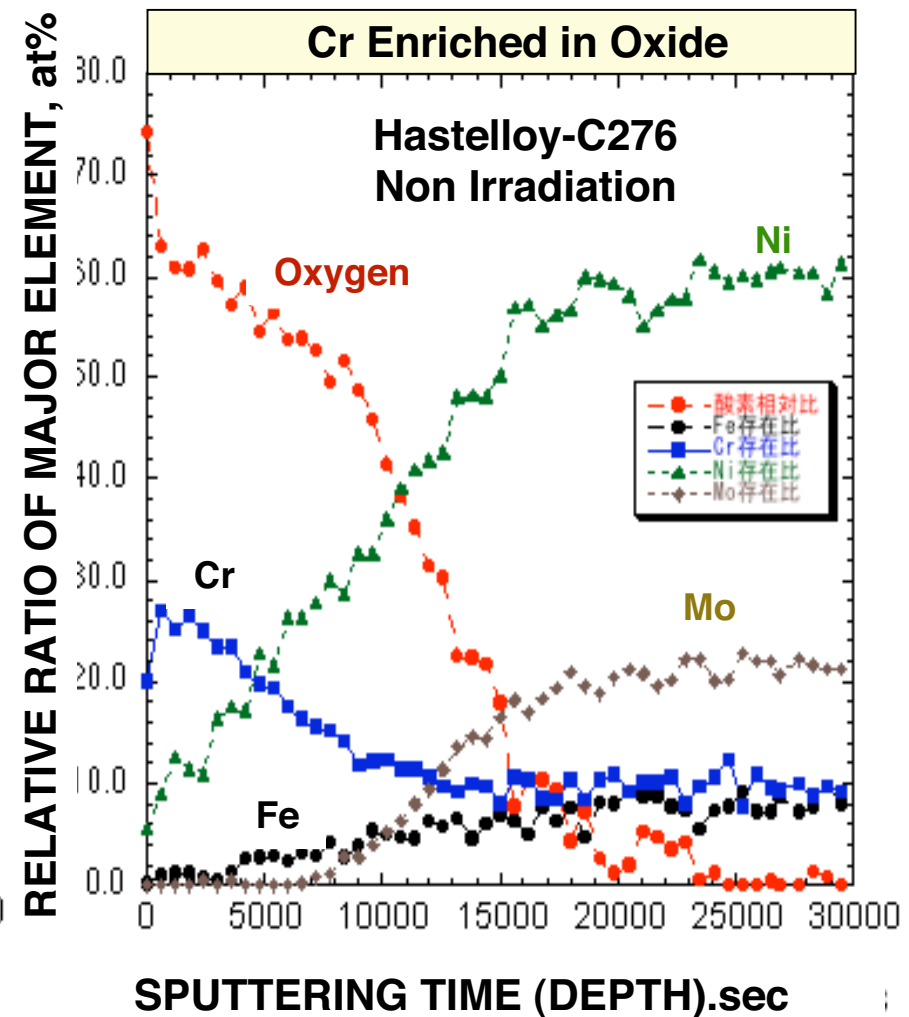
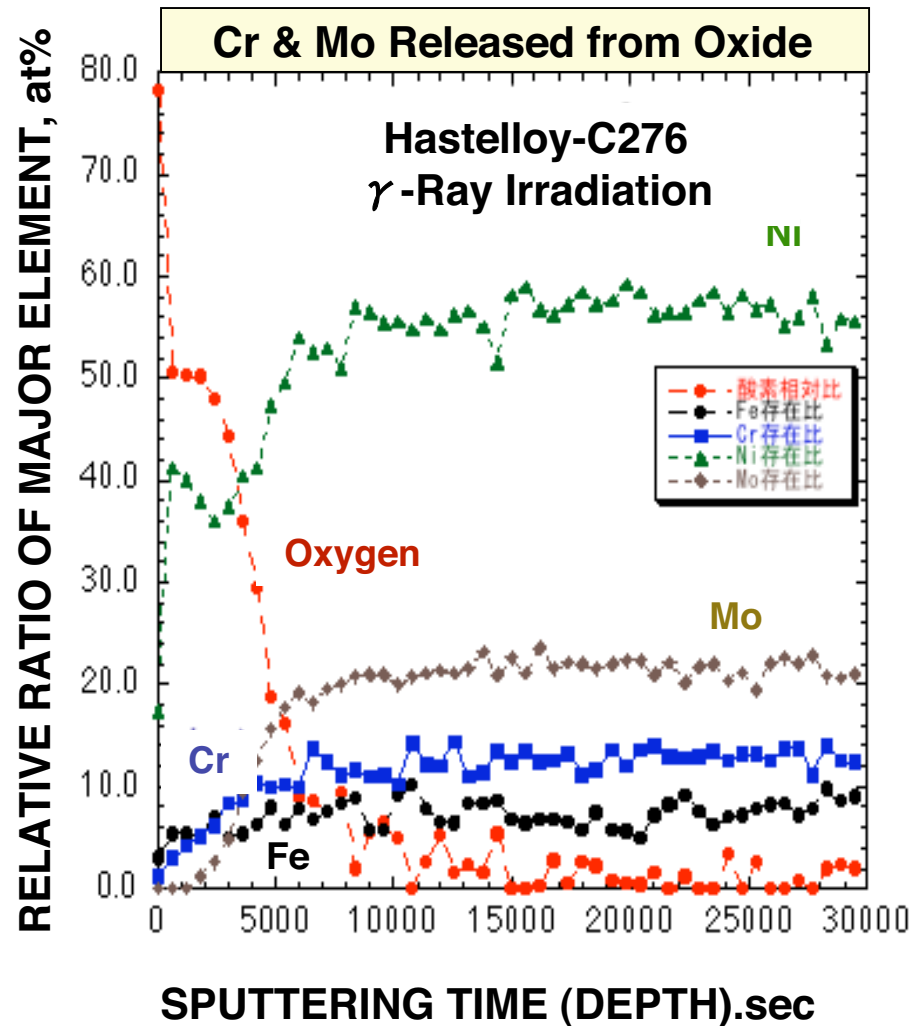
Effect of oxidation potential by irradiation

Immersion Tests of Hastelloy-C-276 in SCW Loop

Temperature; 400°C, 24.7MPa, 1000hr

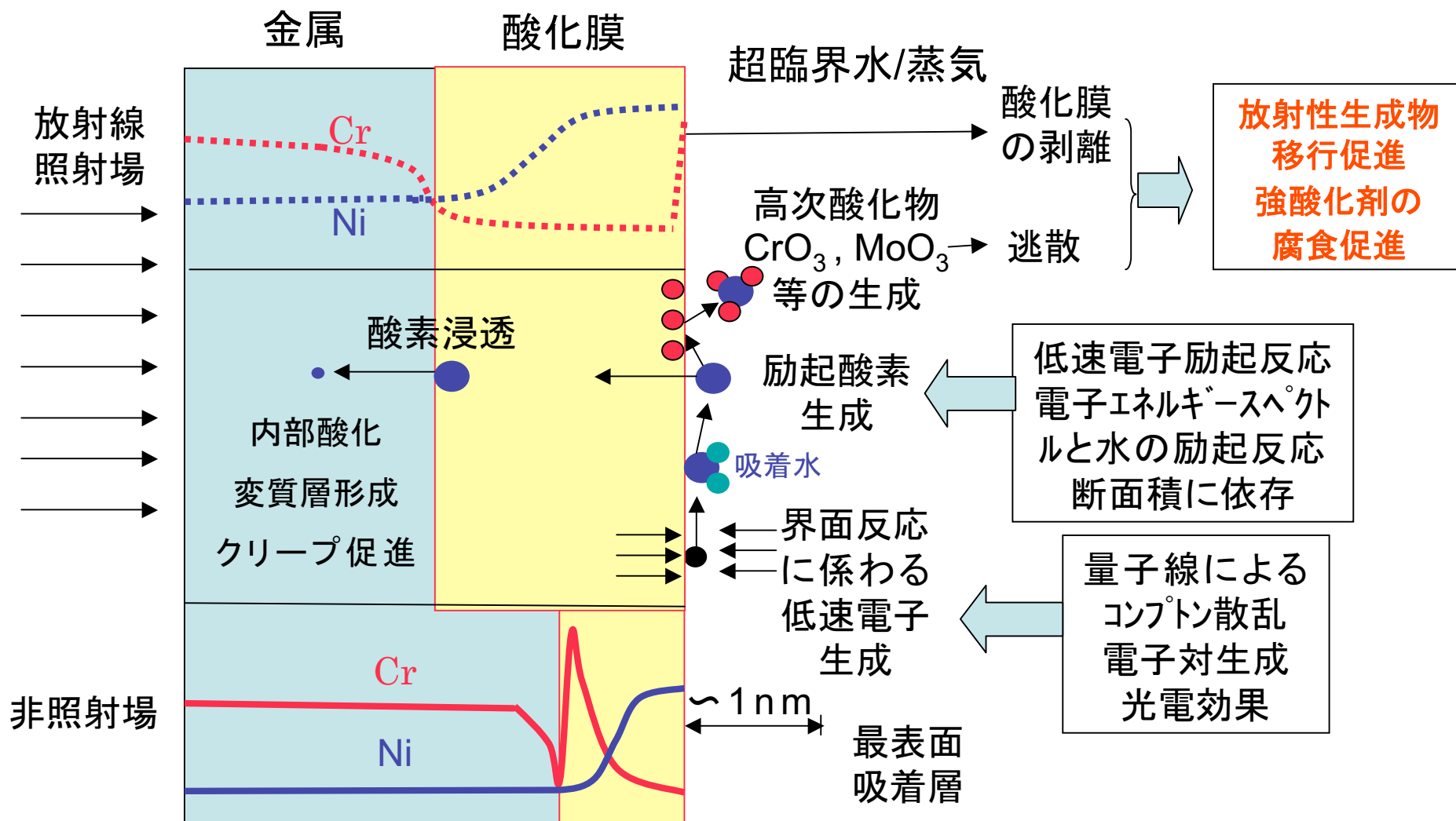
DO; 5ppb, DH; 0ppb

γ -Ray Irradiation; 3.0×10^4 Gy/hr



超臨界圧水腐食への放射線誘起界面反応の影響

放射線励起界面反応の模擬試験；低速電子励起酸素の影響



加速器を用いた 照射実験施設提案

炉内模擬放射線場実験

原子炉実験 - 炉内照射ループ

長所: 実原子炉内の模擬、ガンマ線+中性子照射

短所: 実験用原子炉、建設手続き (設置工事認可申請)

放射化、スペースや実験条件の制約、

コバルト60ガンマ線照射実験

線量率が低い (10 kGy/h)、on-off 遅い

電子線加速器実験

線量率が高い (10 kGy/s, min)、on-off 簡単

複数ループ設置可能、 加速器が必要

ガンマ線照射と電子線照射の等価性

ガンマ線と物質の相互作用

- ・ 光電効果
- ・ コンプトン効果 二次電子の生成

^{60}Co ガンマ線 (1.17, 1.33 MeV)

- ・ 電子対生成 $>1.02 \text{ MeV}$

エネルギー増



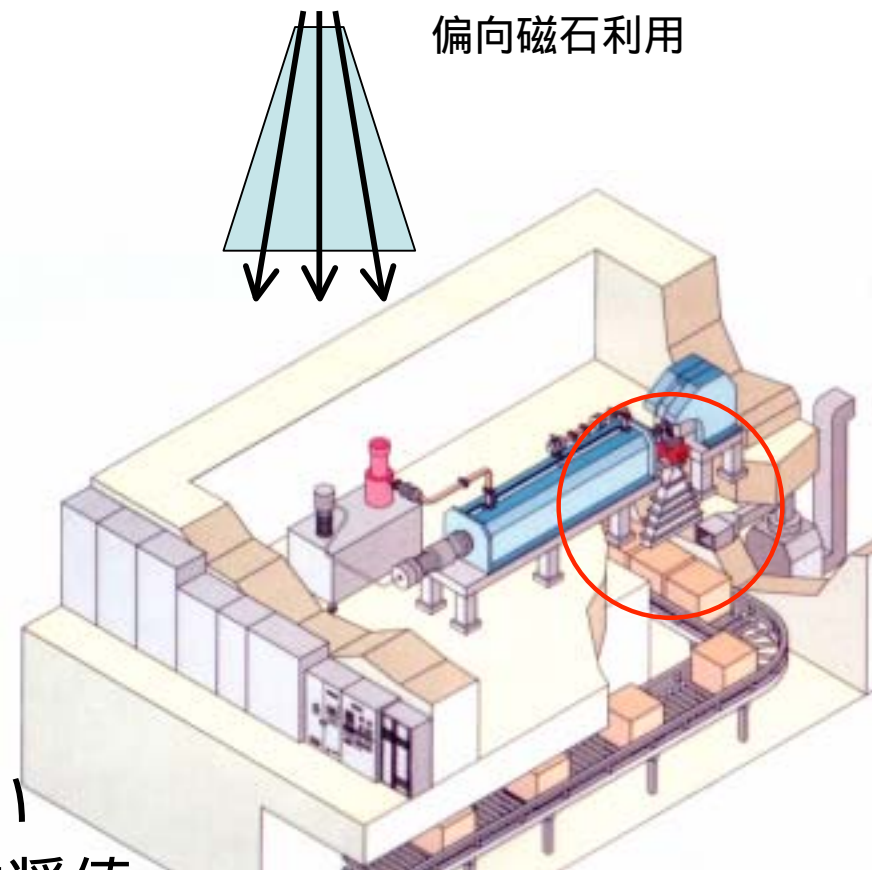
ガンマ線は物質との相互作用で高エネルギー電子を生成し、この生成電子が放射線分解に寄与する事になる。
従って、ガンマ線照射は電子線照射と等価と考えられる。

放射線滅菌用ライナック (10 MeV)



スキャンフオン

偏向磁石利用

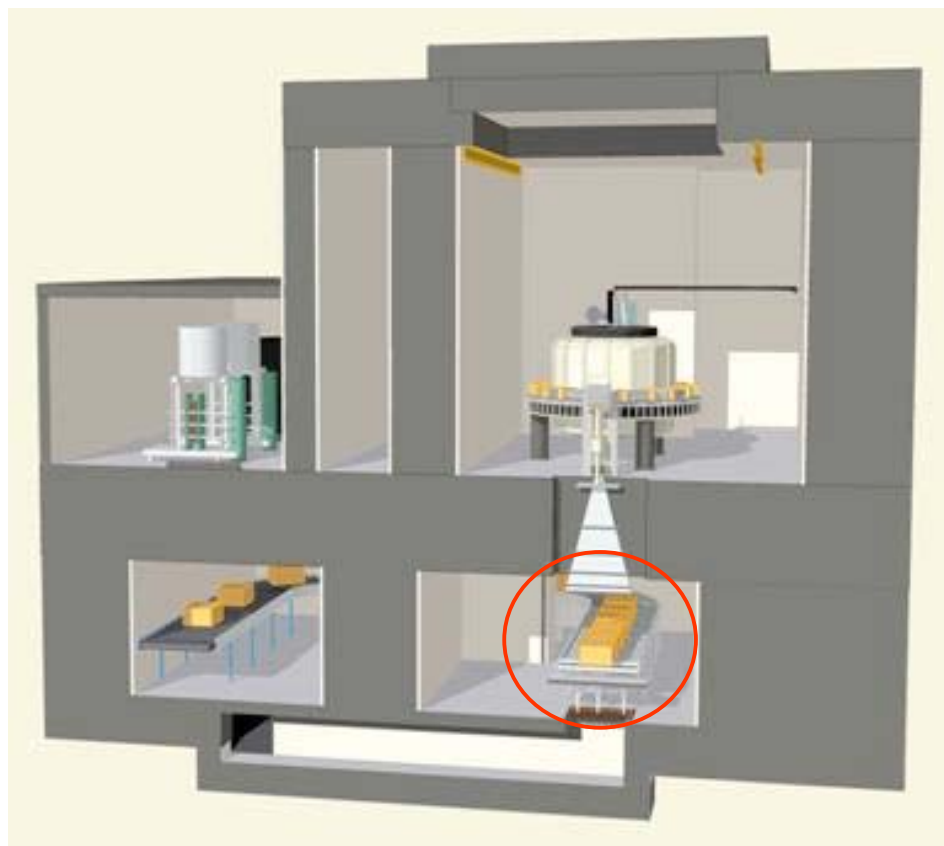


電子線による放射化

- 10 MeV 以上で放射化が著しい
- 10 MeV 電子線 <- WHO 推奨値

工業利用では放射化回避のため10 MeVが上限

商業用照射システム

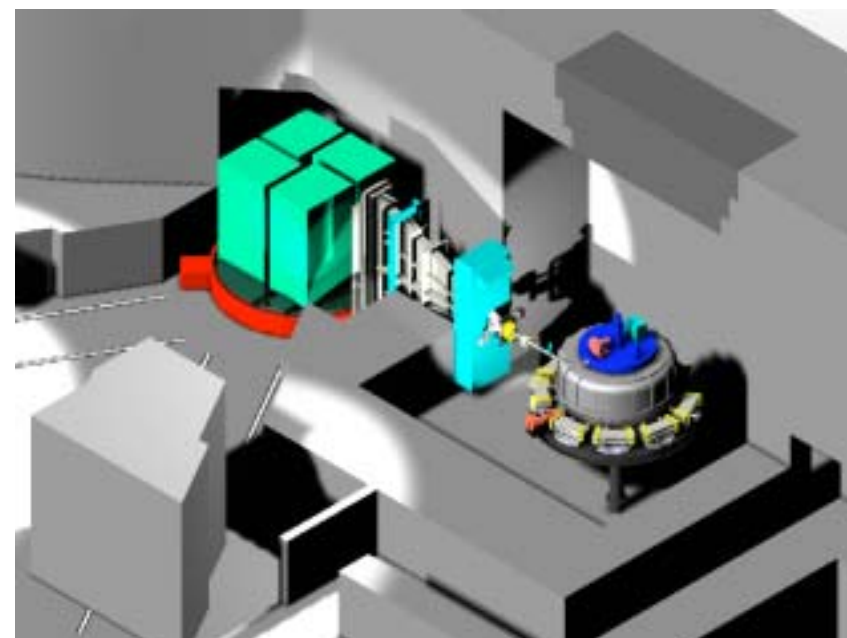


10 MeV

150 kW

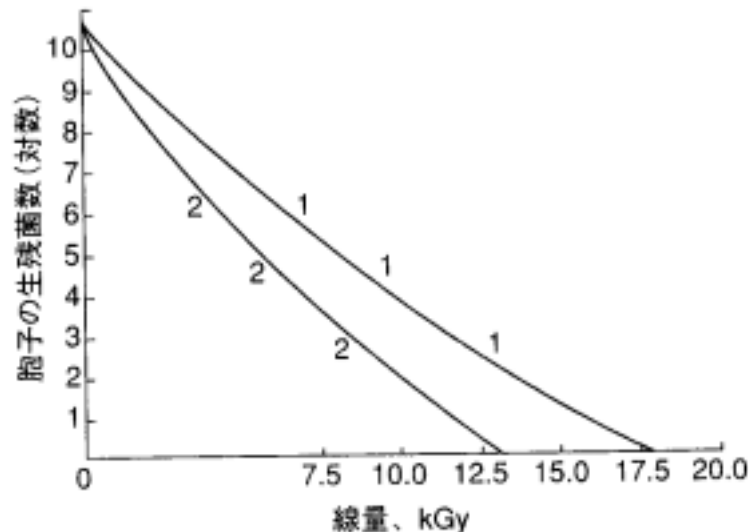
Rhodotron

原子燃料工業(株)



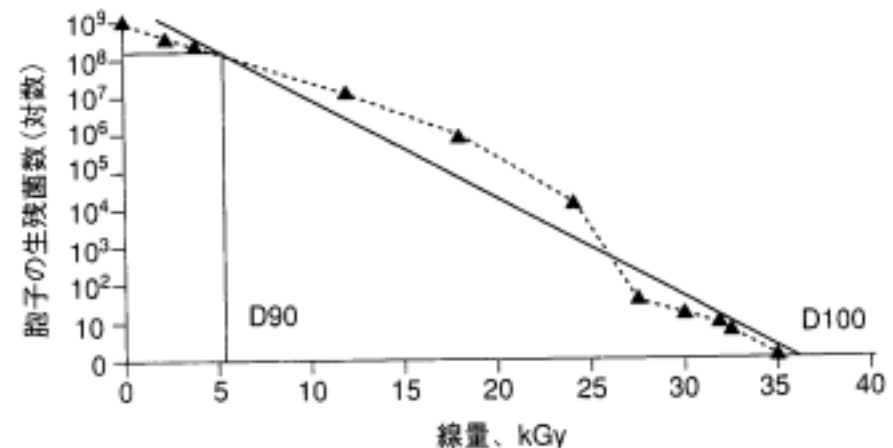
X線変換による照射

炭疽菌の放射線殺菌効果



皮革上で乾燥した炭疽菌胞子のガンマ線殺菌効果 (ブルガリア)

1 : 811 株 2 : Behring 株



凍結下での炭疽菌エームス株のガンマ線殺菌効果 (イギリス)

10 k Gy ~ 15 k Gy で感染予防が十分可能

約 20 k Gy で郵便物中に混入された炭素菌を完全に殺菌

郵便物のビーム処理

USPS (U. S. Postal Service)

電子線照射滅菌プロセス導入

Titan Corp, Lima, Ohio

IBA (Ion Beam Applications),
Bridgeport, N. J.



DE-BUGGING IBA facility in Bridgeport, N.J., sanitizes mail headed for Washington, D.C., using electron-beam irradiation.



SAFE PASSAGE Boxed mail travels along conveyer system to an electron beam where high-energy electrons destroy anthrax and other biohazards.

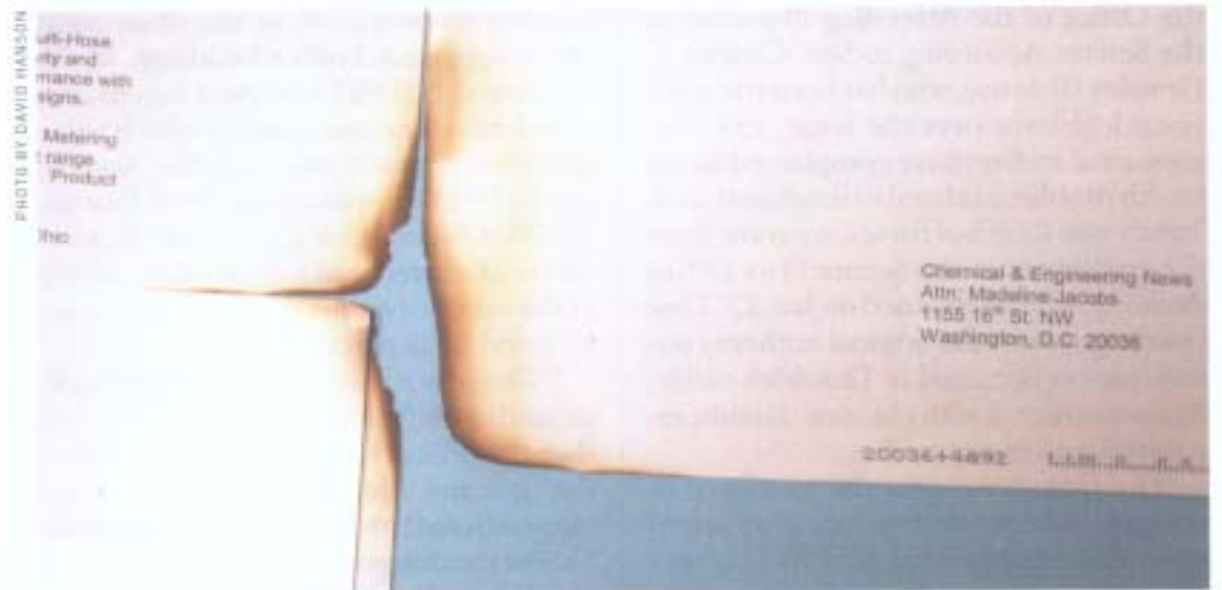
10MeV 電子線
inch 深さの処理

トラブル

郵便物の劣化：黄ばみ、脆くなる、くっつく、損傷

郵便物の温度上昇 - 部分により100~130℃
→ 発火のトラブルあり

56 k Gy → 過剰照射？ 完全滅菌を実施のため



SIDE EFFECTS Mail coming into Chemical & Engineering News's offices in Washington, D.C., did not escape occasional damage.

電子線加速器による材料照射試験

RHODOTRON® TT 100

10 MeV / 35 kW



Key Technical Features

- Up to 10 MeV Electron Beam Energy
- Up to 35 kW Beam Power
- Advanced Scanning Options (optional with control)
- Exceptional Beamline Current Density
- State-of-the-Art Control System
- High Electrical Efficiency
- Simple and Robust Design

User Benefits

- Deep product penetration
- Lowest unit costs for medical device sterilization
- Highest throughput, improved machine ratios, fast beam production
- Precise, flexible, even and highly reproducible product exposures
- Easy to witness, operate, maintain and troubleshoot
- Low operating cost
- Proven commercial reliability, low maintenance requirements

BEAM

Beam energy:	standard optional 2nd output	10 MeV 2.5-5.2 MeV
Beam power at 10 MeV:	guaranteed	35 kW
Scanning range:	standard	30 to 100 cm other configurations available
Beam orientation:	vertical or horizontal	

POWER CONSUMPTION

Stand-by:	<10 kW
At 35 kW beam power:	<210 kW

RF SYSTEM

Mode:	Continuous Wave (CW)
Frequency:	215 MHz
Tetrode type:	Thomson TH 781

DIMENSIONS

Cavity outer diameter:	1.05 meters
Cavity height:	0.75 meters
Total diameter:	1.60 meters
Total height:	1.75 meters
Weight:	2.5 metric tons

RHODOTRON TT 100

The compact and versatile Rhodotron TT100 can be configured in many ways, including either a vertical beam from the top or a horizontal beam from the side (see below).

Special Rhodotron TT100 Beam Layouts



Photo courtesy of Rhodotron TT100 users, Loma Linda

電子線加速器の線量率

電子線加速器の線量率

10 MeV, 35 kW の装置を対象

35 kW $\rightarrow$ 35 kJ/s

10 cc の水に照射を仮定

3.5×10^4 J/s / 10 ml $\rightarrow$ 3.5×10^6 J/kg/s

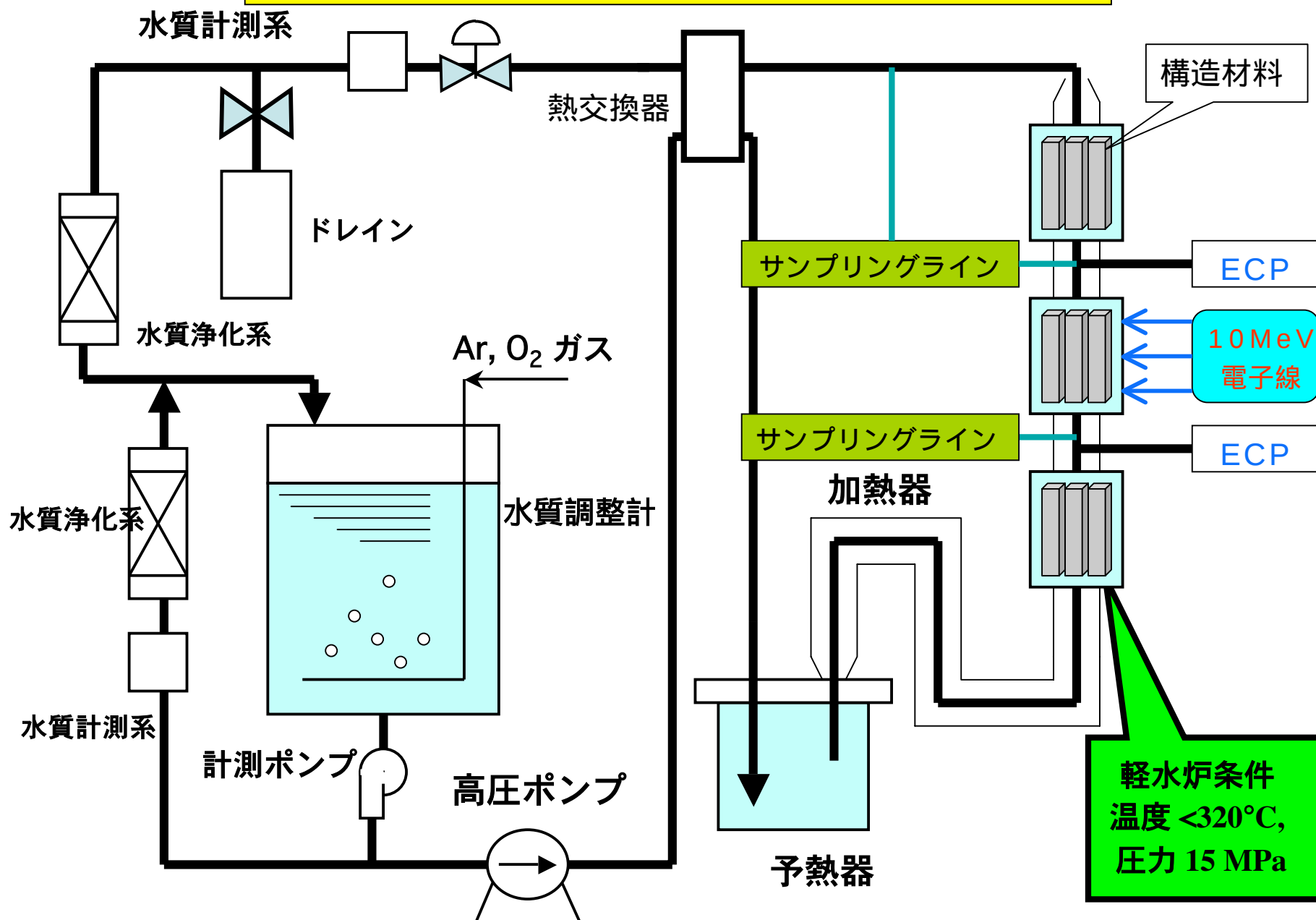
3.5×10^6 Gy/s $\rightarrow$ 3.5×10^3 kGy/s

スキャンで線量低下 ~ 10 kGy/s は可能？

原子炉炉心での線量率

$\sim$ Mrad/s = ~ 10 kGy/s

電子線照射システム



間接効果と直接効果

放射線生物分野 - DNA 損傷

間接効果 - OHラジカル <- 水分解由来

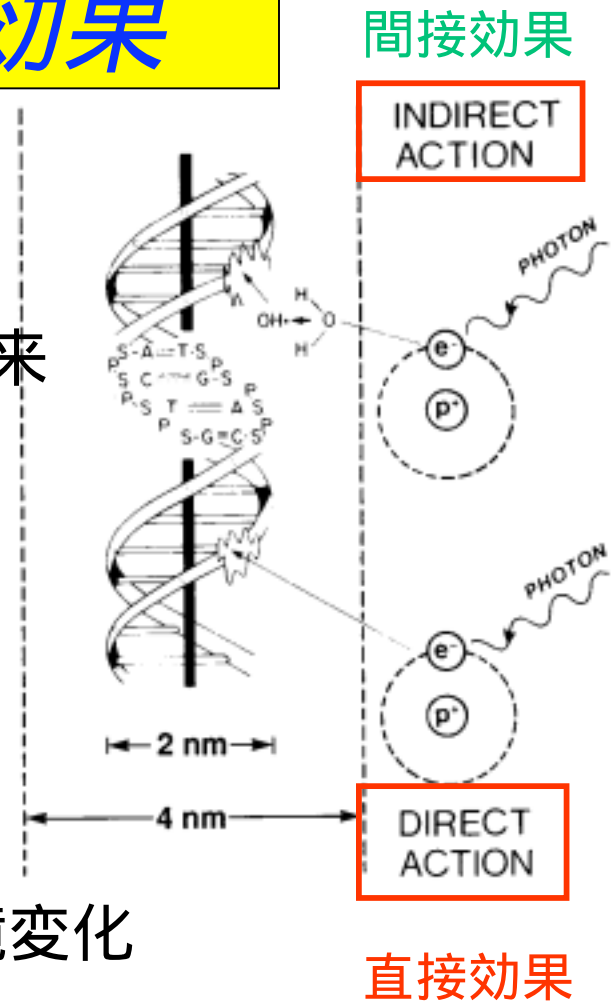
直接効果 - DNA 自身の放射線分解

水化学分野での放射線効果

間接効果 <- 水分解由来の化学環境変化

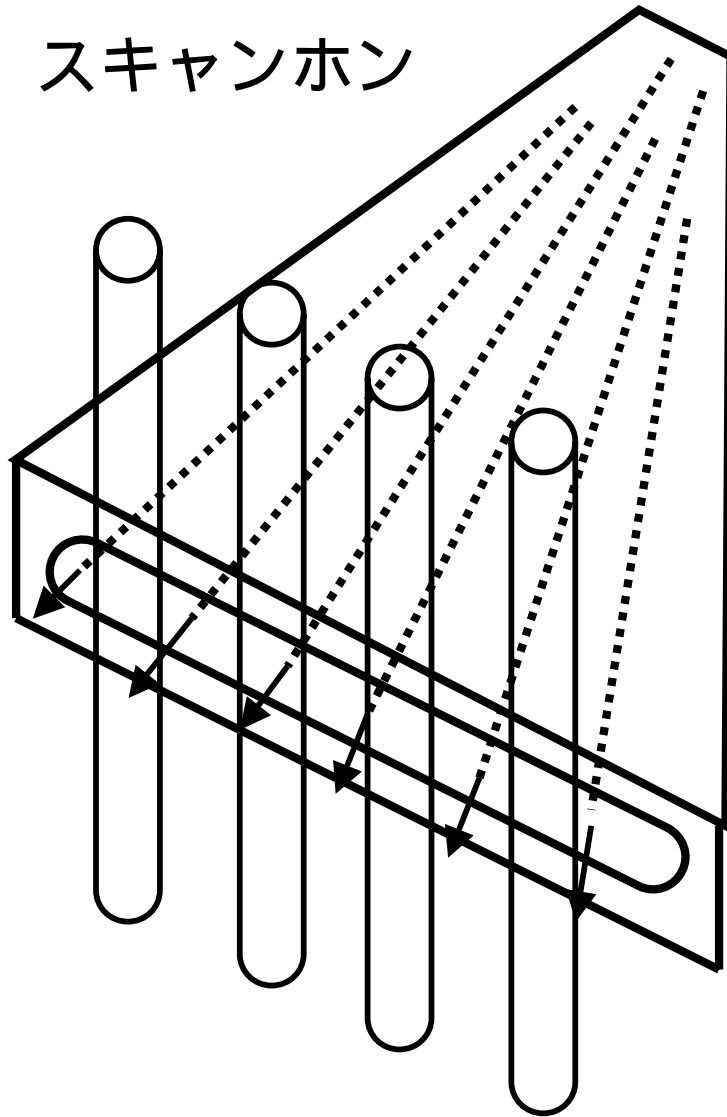
直接効果 <- 水と材料自身への照射効果

界面効果、界面反応



複数ループの設置

スキャンホン



磁場による掃引 200 Hz

複数ループの利用

系統的、効率的

材料の種類

温度

流量

複数の測定

実験実施項目

放射線分解と環境変化

- ・ 放射線線量と $[H_2]$, $[O_2]$, ($[H_2O_2]$) 変化
- ・ 放射線線量率と ECP 変化
- ・ 実験データとシミュレーション

放射線場下での材料腐食実験

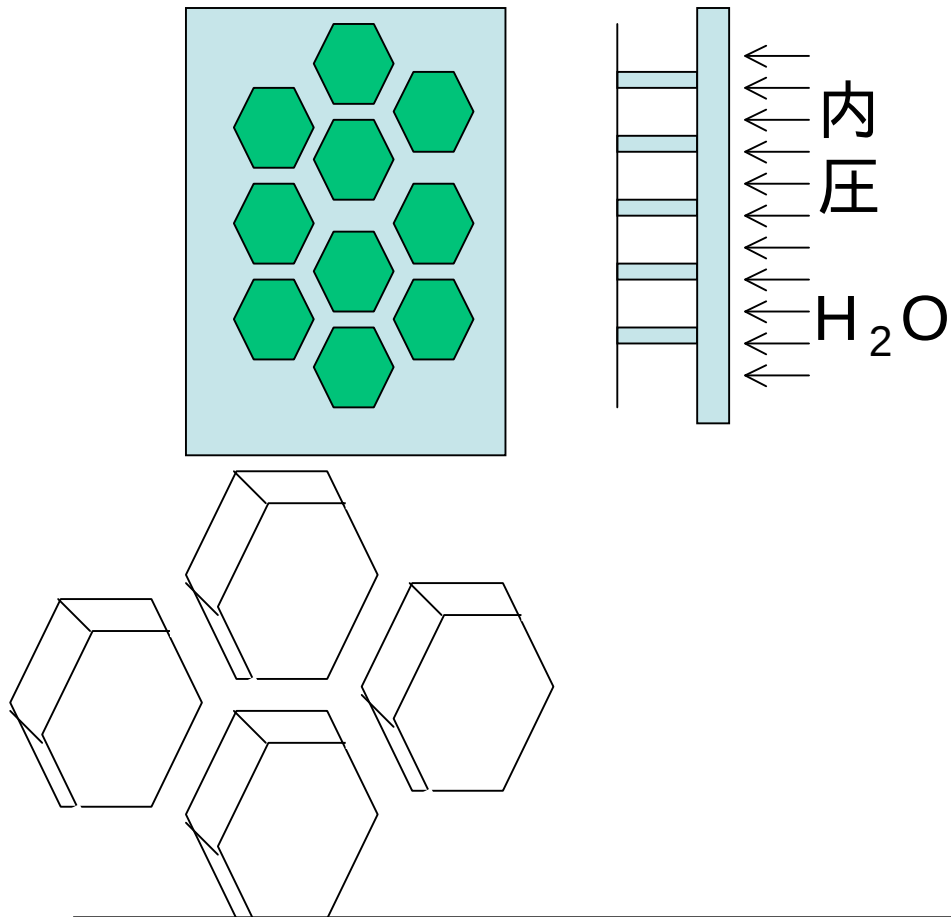
- ・ 放射線による腐食挙動変化
重量変化、SEM, Auger, SIMS,...
生成酸化物の種類、形成量変化、形態変化
- ・ in situ measurement
溶解度、Raman 分析等、腐食計
- ・ 直接効果と間接効果 / 界面反応

実験パラメーター

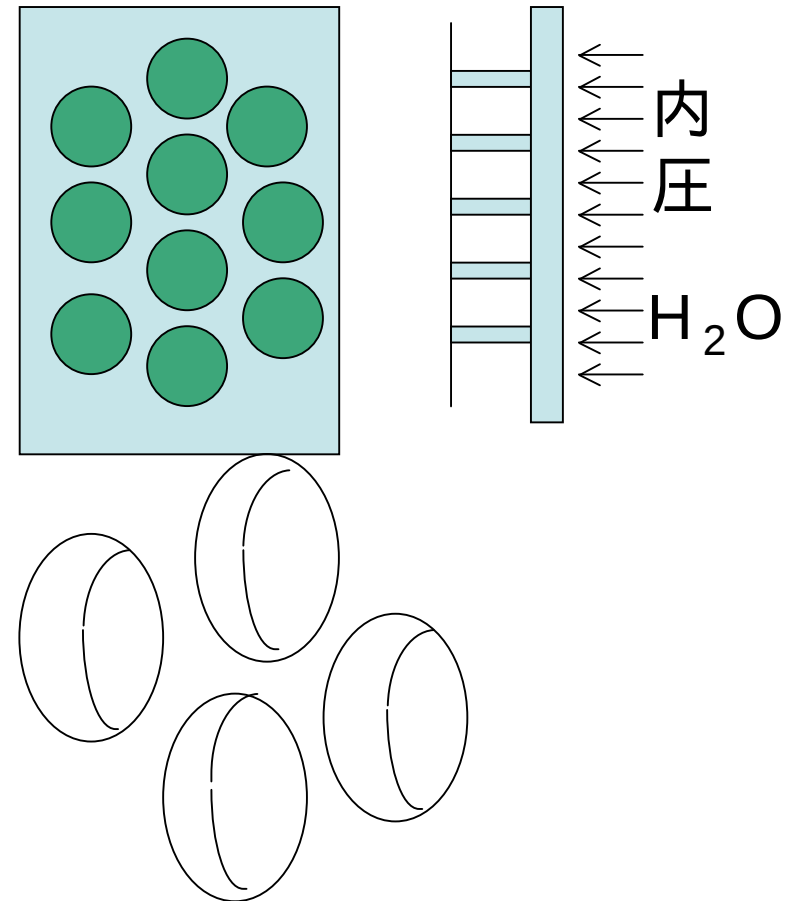
- ・ 温度、(圧力)、線量率、流量

照射容器の強度設計

ハニカム構造
honeycom structure

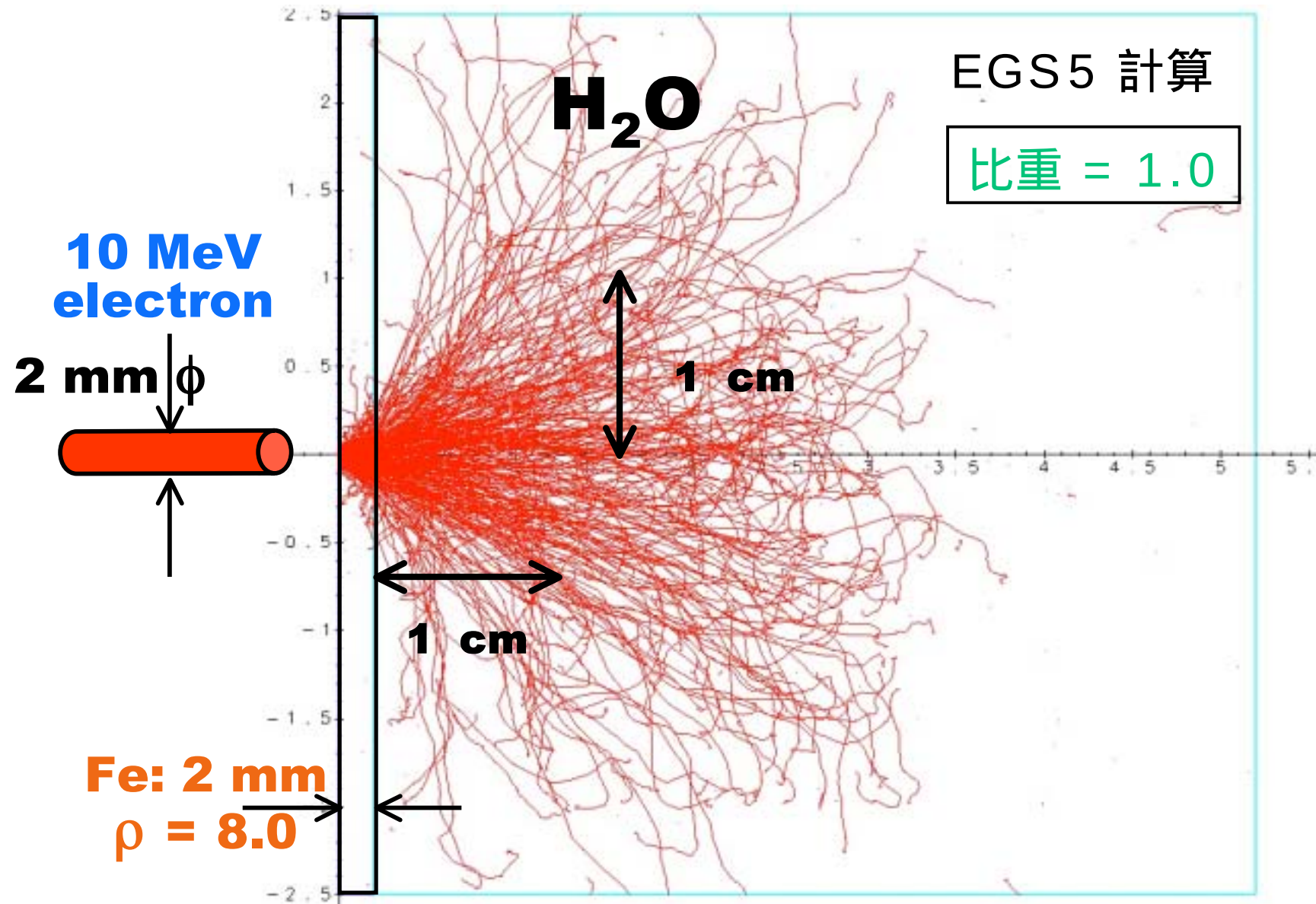


円筒くり抜き構造



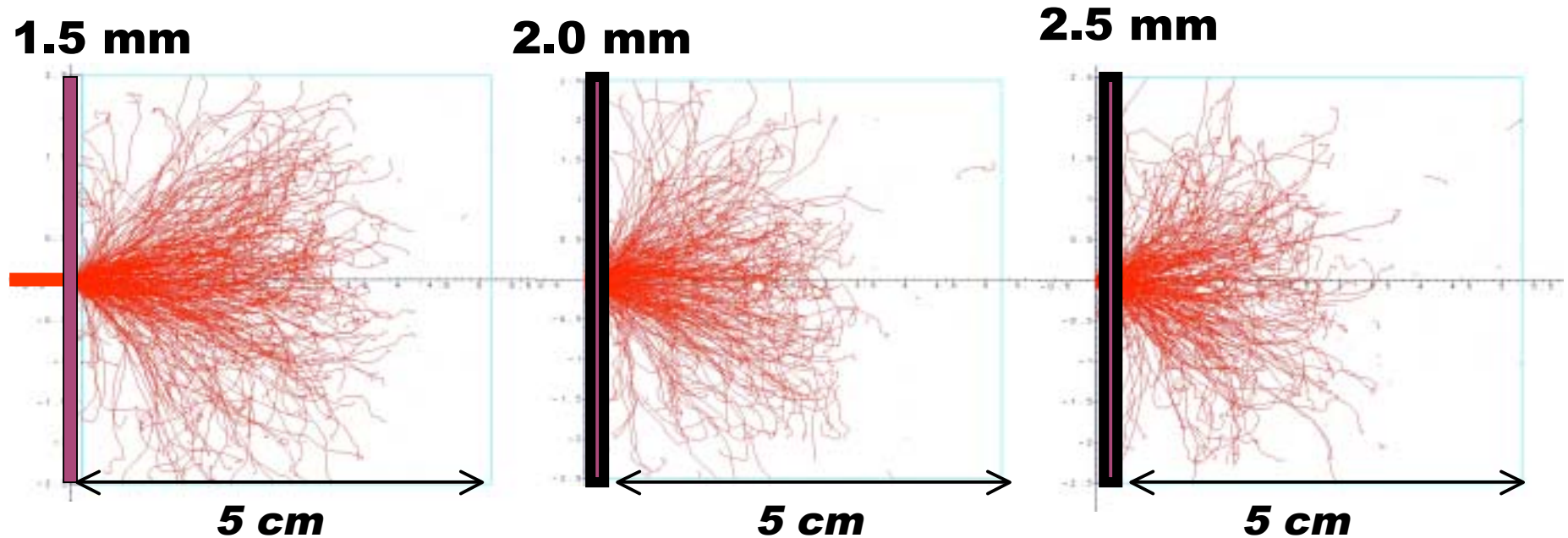
内圧に耐え、電子エネルギーの損失を最小限に

金属壁を透過した電子の飛跡



金属壁を透過した電子の飛跡

壁厚依存性



温度	280°C	300°C	320°C	340°C
飽和蒸気圧力	6.42 MPa	8.59 MPa	11.3 MPa	14.6 MPa
水比重	0.75	0.71	0.67	0.61

まとめと今後の展望

放射線場での系統的实验が重要

- ・放射線効果の評価が不可欠
- ・照射効果実験のための技術の確立

電子線加速器を用いた照射システムの提案

- ・ 10 MeV 照射装置、高線量率
- ・ 複数ループでの効率的な実施
- ・ in situ 測定
- ・ ラジオリシス実験 ・ ECP測定
- ・ 腐食実験

確証実験の実施

- ・ 照射チェンバー設計