

ISSN 1342-0852

KURRI-KR-

ONLINE ISSN 2189-7107
ONLINE KR-

京都大学原子炉実験所
第 24 回原子炉・放射線技術研修会
京都大学総合技術部
第 15 回第 5 専門技術群（核・放射線系）専門研修会

報 告 書

Proceedings of the 24th Technical Meeting on Nuclear Reactor and
Radiation for KURRI Engineers
AND
the 15th Technical Official Group Section V Meeting in Kyoto University

2015 年 12 月 11 日開催

編集：平成 28 年度京都大学原子炉実験所技術室
第 5 専門技術群世話人会

京都大学原子炉実験所
Research Reactor Institute ,Kyoto University

巻頭言

本報告書は、平成 27 年 12 月 11 日に開催された京都大学原子炉実験所第 24 回原子炉・放射線技術研修会の内容をまとめたものである。この研修会は、同時に京都大学総合技術部の第 15 回第 5 専門技術群（核・放射線系）専門研修会を兼ねており、京都大学における原子炉・放射線に携わる技術職員の技術研修の場となっている。

原子炉実験所では、原子炉や加速器施設等の大型施設を有していることから、その安全確実な運営が必須であり、特に原子炉施設には社会的関心も大きく、失敗が許されない緊張感のある安全管理が求められている。技術職員は、まさしくその中核となる現場を預かる業務を行っており、高い技術とモラルが必要である。さらに、我々の研究所は全国共同利用研究所であり、所内の施設や装置は全国の研究者が遠くから訪れて利用するものであるため、常に最高レベルの研究が実施可能であることが求められている。そのために、常に研究環境のアップデートを行い、最新の研究動向に絶え得る性能を維持しなければならない。

決められたルールを確実に守り、堅実な管理作業を行うことは、原子炉施設を預かる組織として当然のことであるが、あらゆる業務において「改善」を進めなければならないことも、また必要なことである。原子炉施設では、厳しい規制で決められたことを確実に実施するだけでも大変なことなのに、さらに日々の改善を続けるのは、大変な努力と強い意思が必要であろう。

これらの高度な要求に答えるため、原子炉実験所では研修会を毎年行ってきており、本年度で 24 回となる。単に回数を重ねるだけでは意味がなく、これを日常の業務に結びつける必要がある。本年度は、特別講演として、実験装置の高度化の観点から「低速陽電子ビームの発生から応用」について、原子炉施設の安全を考える観点から「広島から福島まで」をお話頂いた。また、実験所の技術職員からは「放射性廃棄物の現状」、「実験装置のトラブルとしての重水漏洩への対応」、「環境試料中の放射能測定」についての報告があった。慣れないこともあって、技術職員にとってこのような報告は負担が大きいと思うが、仕事を公表して違った方向からの意見を聞くことは、自らを鍛えることになり、さらなる仕事の質の向上につながるようになるだろう。

今回も技術職員の積極的な参加と議論が行われたが、そのような活動が、これまで大きな事故も無く原子炉施設が運営されてきたという実績につながったものと考えられる。その努力を高く評価すると共に、今後もさらなる研鑽を期待したい。

2016 年 7 月 7 日
京都大学原子炉実験所
所長 川端祐司

特別講演・技術発表

平成 27 年度
 京都大学総合技術部 第 15 回第 5 専門技術群（核・放射線系）専門研修会
 京都大学原子炉実験所 第 24 回原子炉・放射線技術研修会

日時：平成 27 年（2015 年）12 月 11 日（金）10：30～17：00

場所：【講演・発表】京都大学原子炉実験所 事務棟会議室

プログラム

受付：10：00～10：30	
開会挨拶：10：30～10：40 原子炉実験所 所長 川端祐司	
特別講演（1）：10：40～11：50 「低速陽電子ビームの発生・制御と計測システムへの応用」 原子炉実験所 原子力基礎工学研究部門 教授 木野村 淳	司会：阪本 雅昭
昼休み：12：00～13：00	
特別講演（2）：13：05～14：15 「広島・長崎、チェルノブイリ、福島」 原子炉実験所 原子力基礎工学研究部門 助教 今中 哲二	司会：猪野 雄太
休憩：14：15～14：30	
技術発表（1）：14：30～15：10 「京都大学原子炉実験所 放射性廃棄物の現状」	司会：中森 輝
原子炉実験所 技術室 井本 明花	
休憩：15：10～15：25	
技術発表（2）：15：25～16：05 「重水設備トラブルについて」	司会：飯沼 勇人
原子炉実験所 技術室 吉永 尚生	
休憩：16：05～16：20	
技術発表（3）：16：20～17：00 「環境試料中の放射能測定について」	司会：藤原 慶子
原子炉実験所 技術室 三宅 智大	
懇親会：17：30～（会費 2000 円）	

参加者名簿

講演者

木野村 淳：京都大学原子炉実験所 原子力基礎工学研究部門
今中 哲二：京都大学原子炉実験所 原子力基礎工学研究部門

発表者

井本 明花：京都大学原子炉実験所 技術室
吉永 尚生：京都大学原子炉実験所 技術室
三宅 智大：京都大学原子炉実験所 技術室

技術職員受講者

尾崎 誠：京都工芸繊維大学 高度技術支援センター
吉田あゆみ：京都大学 人間・環境学研究科

以下、京都大学原子炉実験所技術室

阿部 尚也	飯沼 勇人	猪野 雄太
井本 明花	大野 和臣	荻野 晋也
奥村 良	金山 雅哉	栗原 孝太
小林 徳香	阪本 雅昭	土山 辰夫
中森 輝	藤原 靖幸	藤原 慶子
丸山 直矢	南 馨	三宅 智大
山田 辰矢	山本 弘志	吉永 尚生
吉野 泰史		

低速陽電子ビームの発生・制御と計測システムへの応用

原子力基礎工学研究部門 木野村 淳

陽電子は電子の反粒子であり、電子と同じ質量で逆の電荷を持つ。真空中での陽電子は、電子と同様の手法を用いて、電場や磁場により加速や軌道制御を行う事ができる。しかし、陽電子が材料の中に入ると、陽電子は電子とはまったく異なる様子を示す。電子が永続的に材料中で存在できるのに対して、陽電子はピコ秒 (10^{-12} s) からナノ秒 (10^{-9} s) オーダーの短い時間で、材料中の電子と対になって消滅する。その際に放出されるエネルギー0.511MeV の 2 本の消滅ガンマ線を調べることによって、陽電子の消滅状態を知る事ができる。すなわち、陽電子が正の電荷を持つために陽電子は原子核から遠い場所（原子空孔や空隙）に捕らえられ易く、そのような場所は電子の密度も低いため、対消滅の確率も減り、その結果、陽電子の寿命が延びる。陽電子の入射時間と消滅時間の差（＝陽電子寿命）を調べることにより、材料中の空孔・空隙に関する情報が得られる。また対消滅を起こすときに、消滅相手の電子状態により消滅ガンマ線のエネルギー分布の変化（＝ドップラーシフト）を起こすため、消滅サイトに関する情報を得る事もできる。このような陽電子固有の性質を利用して、陽電子消滅分光法は材料のユニークな分析手段として用いられている。

現在、京都大学原子炉実験所では、原子炉 KUR（Kyoto University Reactor）の B1 実験孔を利用した低速陽電子ビームシステムの開発を進めている。本講演では、KUR 低速陽電子ビームシステムを念頭に入れながら、陽電子消滅分光法とその装置及び応用に関し、以下のような項目について述べる予定である。

- ・陽電子とは
- ・陽電子の発生方法
- ・陽電子を用いた計測法
- ・国内外の陽電子研究施設
- ・KUR 低速陽電子ビームシステムの状況
- ・今後の方向

謝辞：本講演を行うにあたり、東北大学永井康介先生、原子炉実験所徐虬先生、佐藤紘一先生（現鹿児島大学）、及び他の研究協力者の皆様に感謝します。

低速陽電子ビームの発生・制御と計測システムへの応用

原子炉実験所 原子力基礎工学研究部門
木野村 淳

講演概要

1. 陽電子とは
2. 陽電子の発生制御方法
3. 陽電子を用いた計測法
4. KUR低速陽電子ビームシステムの状況
5. 国内外の陽電子研究施設
6. まとめ

陽電子とは

陽電子は電子の反粒子

- ・1930年Diracにより理論予測
- ・1932年Andersonが、霧箱で宇宙線の観測を行う中で、正の電荷を持ち陽子より軽い粒子を発見しpositron(陽電子)と命名。

下記参考論文では、磁場中の粒子の軌跡から、電荷の極性が判定できる。6mm厚の鉛(中央)を通過してエネルギーが減少。

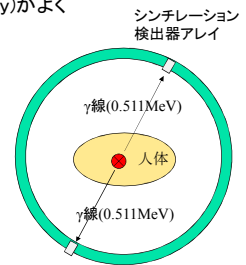
参考論文: C.D.Anderson, Phys. Rev. 43, 491 (1933)

陽電子の関わるもの(1)

陽電子と言えば、癌の診断に用いられるPET(Positron Emission Tomography)がよく知られている。

陽電子放出核種である ^{18}F で修飾した薬剤FDGを人体に投与すると、FDGはブドウ糖に類似の構造を持つため、癌細胞に多く取り込まれる。

^{18}F が崩壊してできる陽電子の消滅ガンマ線を検出すると、FDGが取り込まれた部位をCTの原理で画像化できる。



陽電子の関わるもの(2)

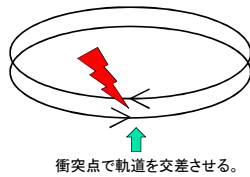
高エネルギー加速器研究機構の素粒子実験設備KEKB
(電子陽電子衝突加速器Bファクトリー)

周長約3kmの円形加速器で加速した
8GeVの電子と

3. 5GeVの陽電子を
衝突させる実験装置。

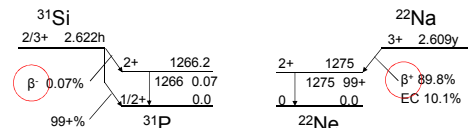
詳しくはKEKのホームページ参照。

(例)
<http://www2.kek.jp/accl/introKEKB/>



陽電子の関わるもの(3)

放射性同位元素の β^- 崩壊 → 電子の放出
 β^+ 崩壊 → 陽電子の放出

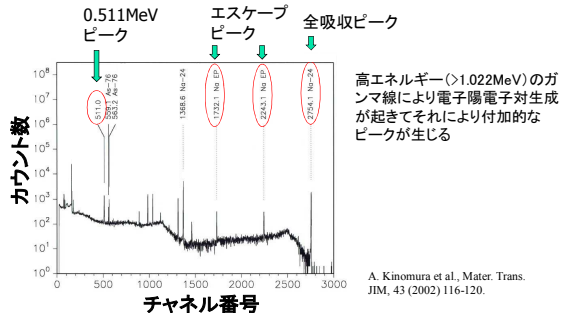


β^- 崩壊: 原子番号が増加

β^+ 崩壊: 原子番号が減少

陽電子の関わるもの(4)

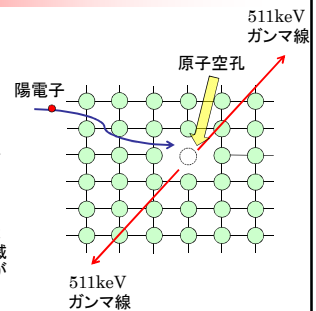
γ線スペクトルの中にも陽電子に関わる現象が観測される



分析手段としての陽電子：陽電子消滅法

陽電子を材料分析に用いる

- 陽電子は物質中の電子と消滅してγ線(0.511MeV)を2本放出
- 陽電子は正の電荷を持つので原子核から遠ざかろうとする
(完全結晶では格子間に存在)
- 物質中に空孔があると、陽電子は空孔にトラップされ、電子と消滅するまでの時間(陽電子寿命)が長くなる



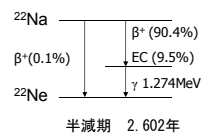
講演概要

- 陽電子とは
- 陽電子の発生制御方法
- 陽電子を用いた計測法
- KUR低速陽電子ビームシステムの状況
- 国内外の陽電子研究施設
- まとめ

陽電子の発生方法

基本的には2つに分類できる

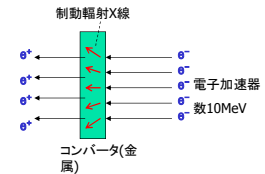
①放射性同位元素を使う方法



他の放射性同位元素もあるが、研究室レベルでは²²Naが主流

放射線施設であれば比較的手軽に利用可能(密封線源)

②電子対生成による方法



装置は大掛かりだが高強度の陽電子が得られる

陽電子の発生方法：放射性同位元素

実際に使用されている／使用可能な核種

- 長半減期のもの：²²Na (2.6y)、⁶⁸Ge (271d)
アイソトープ協会から購入、研究所内の加速器で形成(JAEA)
- 短～中半減期のもの(PET用)：¹⁸F (110min)など
デリバリー施設(全国に218)、加速器施設(全国に149)
(日本核医学会PET核医学分科会ホームページより)
- 短～中半減期のもの(陽電子計測用)：⁶⁴Cu (12.7h)、¹³N (9.97min)
原子炉中性子照射で形成、静電加速器の重水素ビーム照射で形成

陽電子の発生方法：電子対生成

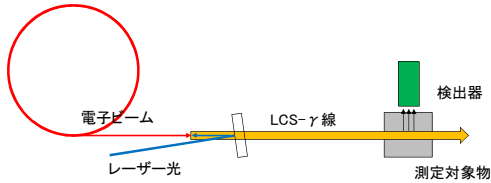
電子対生成を起こすことが可能な1.022MeV以上のガンマ線、エックス線があれば原理的に可能。

・電子線加速器の制動放射
数10MeVのエネルギー必要(電子線形加速器が多く用いられる)

・原子炉炉心のガンマ線

陽電子の発生方法：直接電子対生成

レーザーコンプトン散乱法(LCS:Laser Compton Scattering)をもちいて加速器で平行性の高いガンマ線を作り、材料中に直接陽電子を対生成で発生させる方法が用いられている。



- ・比較的分厚い試料が利用可
- ・方向のそろったγ線を使うことから、CTなどへも応用可
- ・ドップラー拡がり測定、陽電子寿命測定のどちらも実施例あり

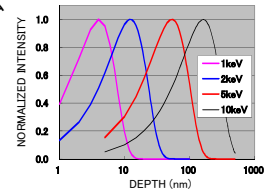
陽電子エネルギーの制御:「低速陽電子」とは?

①白色陽電子
エネルギーを揃えないで照射→分厚い試料全体を測定

²²Naの場合、0.2MeVにピークを持つ
ブロードなエネルギー分布を持つ

②エネルギー可変陽電子ビーム
(=低速陽電子ビーム)

陽電子のエネルギーを一定かつ可変にすると、打ち込み深さを表面から数μメートルまで任意の深さに制御できる。
→ 薄膜試料や表面分析可能



陽電子の減速

陽電子が減速材の中に入ると固体の構成原子と衝突を繰り返し熱エネルギー程度(～0.01eVのオーダー)にエネルギーを失う(熱化)。

減速・熱化された陽電子を減速材の外に取り出す必要がある。

→ それは負の仕事関数を持つ減速材を利用する。

負の仕事関数：陽電子は固体内よりも真空中にいた方がエネルギー的には有利になる。

タングステンの場合、仕事関数は-3.0eV。減速材の外に陽電子が出ると3.0eVを陽電子が得る。

陽電子は固体内で拡散する。

鉄やニッケルの場合、拡散長は>100nm。すなわちこの範囲にある熱化した陽電子は表面に向かって染み出していく。

陽電子の減速 (2)

高速(白色)陽電子を熱エネルギー程度まで減速するための材料=減速材(moderator)

減速材の効率は非常に悪い

Wのメッシュの場合、 $10^{-4} \sim 10^{-3}$

固体Ne減速材の場合でも $< 10^{-2}$

同じ材料であれば、陽電子を捕捉する場所(結晶粒界や結晶欠陥)がないほど良い。

→ この理由から、単結晶金属や、高温で熱処理(アニール)された多結晶の金属材料が用いられる。

陽電子の減速 (3)

同じ減速材であっても、構造によって減速効率は変わるため、様々な形が検討されてきた。

バルク材料(反射型モデレータ)

Cu単結晶

W単結晶、多結晶

Ne(冷却固体化)

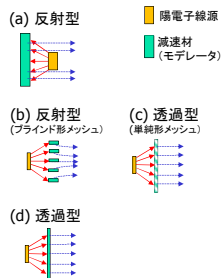
薄膜材料(透過型モデレータ)

W単結晶、多結晶

Ni単結晶、多結晶

メッシュ材料(反射型の一つ)

W多結晶



陽電子の減速 (4)

減速材(モデレータ)の例

京大原子炉



W箔で井桁を組んでから、2000℃以上でアニール(電子ビーム加熱)割れたり折れたりしやすい。

19

陽電子ビームの伝播

同じ荷電ビームであってもイオンビームとはかなり異なる制御

ビームラインに沿って磁場を印加することにより、ビームラインの垂直方向に磁場閉じ込めを行う。

ヘルムホルツコイル (または連続コイル)

20

陽電子の蓄積 (パルスストレッチ)

WITH storage (conventional)
Electron: [Pulse] → [Storage] → [Pulse]
Positron: [Pulse] → [Storage] → [Pulse]

WITHOUT storage (this study)
Electron: [Pulse] → [Storage] → [Pulse]
Positron: [Pulse] → [Storage] → [Pulse]

ストレージセクションの前後にメッシュを置く。
・陽電子が入射したらメッシュに電位をかけて閉じ込める。
・取り出しは出口側のメッシュの電圧を下げる。

リニアックでは必要。放射性同位元素や原子炉では通常不要。

21

陽電子の集束

電子集束系の例 (透過型顕微鏡) 陽電子集束系の例 (輝度増強装置)

22

陽電子の集束(2)

何が難しいか? → 減速材の利用

電子には点光源に近い光源 (線源) がある (電界放射型電子銃など)

陽電子は発生時に数mmから数10mmもあるところからスタートするハンデがある。

電子は輝度の明るい光源があるので、アパーチャーでいい所だけ切り出してやれば良い。

陽電子は線源での強度が足りない。アパーチャーで切ると強度を失う。

エネルギーのそろった陽電子ビームに対して、最適化された減速材を使うと、減速効率率は約10%。これと縮小率1/10のレンズを組み合わせると、ビーム径を1/10に絞る時の強度は10%ですむ。

アパーチャーで1/10のビーム径に絞るには、強度は1/100になってしまう。

→ それなら、減速材を使っても引き合う。

23

陽電子の集束(3)

何が難しいか? → 輸送系の磁気カット

電子の場合、線源部からレンズまでストレートにビームを持ってこることができる (電子源自体が放射線を出すことはない)

陽電子は線源部の放射線が強いので、距離を離す必要があり、線源部からレンズまで磁気輸送系でビームを持ってこることになる。

静電レンズ、または磁気レンズだけで理想的な光学系を組める。

輸送系の磁場は、静電レンズ、磁気レンズ両方に影響を与える。

反転磁場: 擬似ゼロ磁場領域

磁性体スリット: ゼロ磁場領域

24

陽電子の到達を知る

陽電子寿命測定のスart信号をどこから取るか

β^+ 線源である ^{22}Na は1.274MeVの γ 線をスタート信号に使える

測定回路構成

25

陽電子の到達を知る(2)

透過型検出器で陽電子の通過を知る

陽電子源

透過型検出器
・ダイオード→電気信号
・シンチレータ→発光

スタート信号

時間差

消滅ガンマ線信号

試料

26

陽電子の到達を知る(2)

二次電子で陽電子の入射を知る

陽電子源

チャネルトロン・MCPなど

二次電子

時間差

消滅ガンマ線信号

試料

*

27

陽電子の到達を知る(3)

陽電子をチョッパーでパルス化
→ パルス発生タイミングをスタート信号に使用

陽電子源

チョッパー信号

時間差

消滅ガンマ線信号

試料

28

バルク測定装置例

^{22}Na 線源 + 試料 + 検出器の比較的簡単な構成

検出器

試料

^{22}Na 線源

試料

検出器

測定系配置の一例

測定系配置の概念図

29

エネルギー可変低速陽電子ビーム装置の例

産総研電子加速器施設の陽電子ビームライン

Ion beam

Target chamber

Positronium beam

Converter

70MeV Electron Beam

1m

1m

ビームラインの平面図

緑線: 電子
赤線: 陽電子

A. Kinomura et al., J. Phys. Conf. Ser. 443 (2013) 012043

30

講演概要

1. 陽電子とは
2. 陽電子の発生制御方法
3. 陽電子を用いた計測法
4. KUR低速陽電子ビームシステムの状況
5. 国内外の陽電子研究施設
6. まとめ

31

陽電子寿命測定(1)

陽電子寿命スペクトル

- 統計的なばらつきがあるので複数のイベントを測定
- スペクトルの裾の引き方から寿命値を評価
- 複数の寿命値が表れる時は計算機でフィッティング

陽電子寿命は
100psec~数10nsecのオーダー

水素注入と熱処理したSiの陽電子寿命
A. Kinomura et al., J. Appl. Phys. 104 (2008) 034301.

32

陽電子寿命測定(3)

空孔サイズと陽電子寿命の関係

- 評価可能な空孔サイズ:
原子1個~10ナノメートル程度
- 閉空孔、独立空孔でも評価できる
- 空孔の連結性を評価できる

電子顕微鏡等では見ることで
きないサブナノメートル領域の
空孔サイズ測定が可能

Fe中の空孔集合体の大きさに対する陽電子寿命依存性の計算結果
Plotted from M. J. Puska and R. M. Nieminen, J. Phys. F: Met. Phys. 13 (1983) 333.

33

ドップラー拡がり測定

陽電子・電子対消滅に伴う γ 線ピーク(0.511MeV)の拡がりに着目

消滅ガンマ線ピークは、消滅相手の電子の運動量に依存して拡がるため、一般には:

- 空孔の導入→幅が狭く、高いピークに
- 空孔の電子状態も反映→不純物があれば変化

消滅ピークを容易に評価するために、SとWという2つのパラメータを定義する。
S = A/C (low momentum)
W = B/C (high momentum)

34

照射損傷を素過程に分けていくと

原子空孔と格子間原子からなるフレンケルペアに行き着く

高エネルギー粒子

フレンケルペア形成 (原子空孔+格子間原子)

結晶格子

弾き出された原子が次々に損傷を起こすと
→カスケード損傷

35

Si中にイオン注入で形成したナノキャビティの分析

水素イオン注入+熱処理により、結晶Si中に形成される10nmオーダーのポイド構造を指す(He注入でも形成可能)

内壁が活性なSi原子で占められていると考えられ、不純物原子を強力に捕捉(ゲッターリング)

ナノキャビティの断面TEM像

応用先:
・集積回路中の金属不純物の除去
→歩留まり向上
・太陽電池Siの金属不純物除去
→変換効率向上

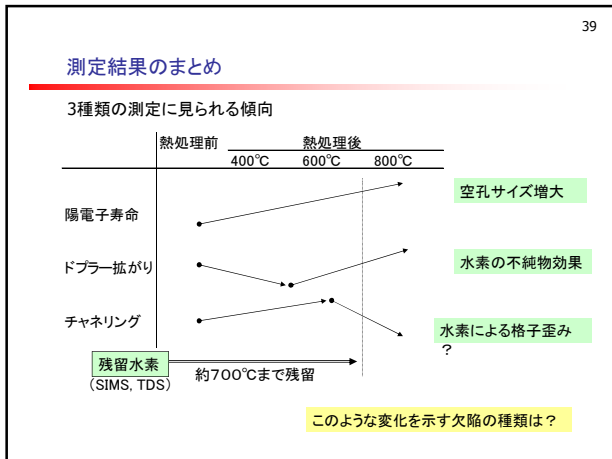
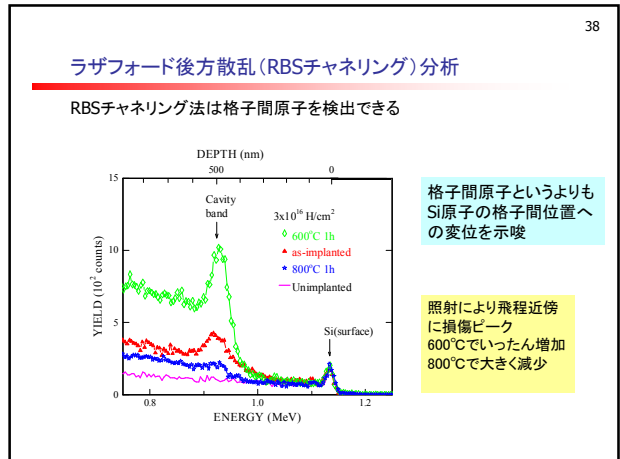
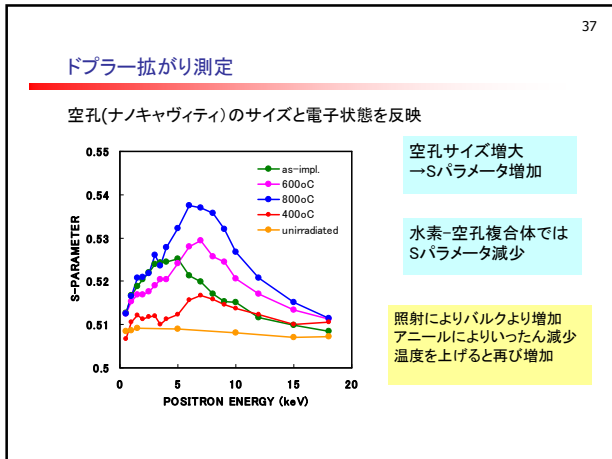
36

陽電子寿命測定

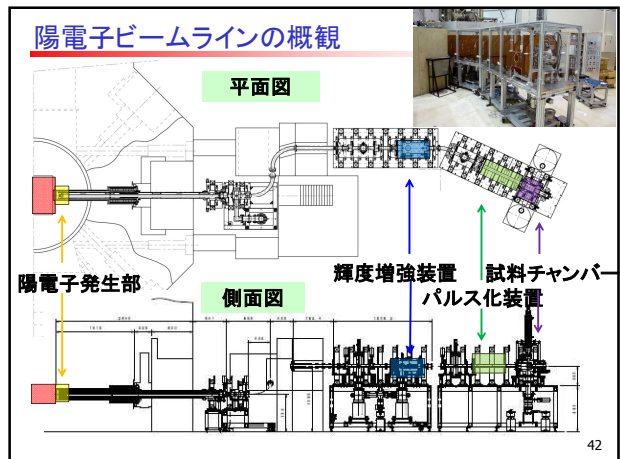
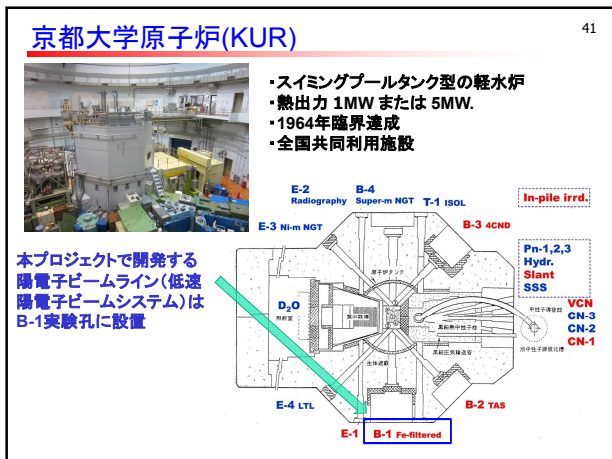
空孔(ナノキャビティ)のサイズを反映

陽電子エネルギー=8keV → 水素の飛程(0.5µm)
3成分分解、 τ_1 → ナノキャビティ、 τ_2 → バルク

温度増加 → キャビティサイズ増大



- ### 講演概要
1. 陽電子とは
 2. 陽電子の発生制御方法
 3. 陽電子を用いた計測法
 4. KUR低速陽電子ビームシステムの状況
 5. 国内外の陽電子研究施設
 6. まとめ



43

KUR陽電子ビームライン初の論文(2014.04)

"Positron beam facility at Kyoto University Research Reactor", Q. Xu, K. Sato, T. Yoshiie, T. Sano, H. Kawabe, Y. Nagai, K. Nagumo, K. Inoue, T. Toyama, N. Oshima, A. Kinomura and Y. Shirai, Journal of Physics Conference Series 505 (2014) 012030.

KUR陽電子ビーム発生第一報(2014.09)

"Development of a mono-energetic positron beam line at the Kyoto University Research Reactor", K. Sato, Q. Xu, T. Yoshiie, T. Sano, H. Kawabe, Y. Nagai, K. Nagumo, K. Inoue, T. Toyama, N. Oshima, A. Kinomura and Y. Shirai, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B 342 (2015) 102.

成果の発表

2014年4月1日 最初の陽電子ビーム発生を確認
(徐先生、佐藤先生)

プロジェクト着手から2年弱でビーム発生に成功

- 国際会議での発表
- 一般講演 3
- 招待講演 2
- 受賞 1

陽電子科学会奨励賞
(佐藤准教授)

44

高輝度化装置

初期ビーム径は約30mmあり、多くの場合、測定には大きすぎる。
→ 陽電子の損失を抑えながら、ビーム径縮小のため高輝度化装置必要

・透過型リモデレータを使用している(産総研の陽電子マイクロビーム装置と同じ方式を採用)
・ただし、高輝度化後に再度磁気輸送で試料チャンバーまで陽電子ビームを導く点で新たな設計指針が必要。

N. Oshima et al., J. Appl. Phys. 103 (2008) 09491

45

講演概要

- 陽電子とは
- 陽電子の発生制御方法
- 陽電子を用いた計測法
- KUR低速陽電子ビームシステムの状況
- 国内外の陽電子研究施設
- まとめ

46

世界の高強度陽電子源

最近の陽電子の国際会議で話題に上がるものを選択
McMaster大Mascher教授提供データから一部引用

装置種類	設置場所	形式	出力/エネルギー	陽電子強度(e ⁺ /s)	名称
原子炉	ミュンヘン工科大	重水炉	20MW	1x10 ¹⁰	FRM-II NEPOMUC
	デルフト工科大	軽水炉	2MW	4x10 ⁸	RID POSH
	ノースカロライナ州立大	軽水炉	1MW	7x10 ⁸	
	マクマスター大	軽水炉	3MW	建設中	
	京都大	軽水炉	5MW	6x10 ⁶	KUR SPS
電子線形加速器	産総研	常伝導	70MeV	~1x10 ⁷	
	高エネ研	常伝導	55MeV	5x10 ⁷	KEK-SPF
	Helmholtz-Zentrum(HZDR)	超伝導	40MeV	?	ELBE MePS, GIPS

47

将来の可能性

今後の検討事項

- 希少な試料、小型の試料に対応できるミリメートルビームを
→ ビームの高輝度化(現在実施中)
- 機能別の装置を複数置くことができ、外部ユーザー持ち込み機器の接続もできるようなマルチポート化を
→ 炉室外へのビームライン延長
- 原子炉材料が測定しやすいビームラインを
→ 放射線管理に関する問題
- さらに高強度なビームを
→ 線源部・ビームラインの最適化

48

将来の可能性(2)

加速器ベースの陽電子源の検討へ

高エネルギープロトン加速器による陽電子線源生成
⁶⁹Ga (p, 2n) ⁶⁸Ge
T_{1/2}=280days

原子力機構の先行研究
サイクロトロンからの20MeVプロトンビーム利用
Maekawa et al. J. Phys. Conf. Ser. 262 (2011) 012035

まとめ

- (1) 陽電子の発生制御および計測技術の一般的な紹介を行った。
- (2) 京都大学原子炉における低速陽電子ビームシステムの開発状況と他の研究機関との比較、今後の展望についてまとめた。

陽電子計測技術については、装置の制約からまだ十分に普及しておらず、今後の展開が期待される。
また、照射誘起欠陥の分析に適した方法であり、原子炉実験所の材料照射研究の発展にも寄与できると考える。

謝辞

本講演に関して以下の方々のご協力に感謝します。

京大原子炉	佐藤紘一*、徐 虬、義家敏正 (*現鹿児島大)
東北大金研	南雲一章、井上耕治、外山健、永井康介
産総研	大島永康
京大工	白井泰治
KEK	兵頭俊夫、和田 健
東理大	長嶋泰之
Technical Univ. of Munich	C. Hugenschmidt, C. Piochacz
Technical Univ. of Delft	H. Schut

京都大学原子炉実験所、産総研、陽電子科学会の皆様

広島・長崎、チェルノブイリ、福島

京都大学原子炉実験所 今中哲二

1895年のレントゲンによるX線の発見をきっかけに、原子・原子核に対する人類の理解は飛躍的な進歩をとげた。1938年末、ドイツのハーンとストラスマンがウランの中性子照射にともなうバリウムの生成の発見し、マイトナーとフリッシュがその現象をウラン原子核の核分裂として説明した。陽子92個と中性子143個から成るウラン235の原子核が2つに割れると、陽子の凝集にともなうクーロンポテンシャルエネルギーが核分裂片の運動エネルギーとして解放される。そして、中性子/陽子比の大きいウラン原子核が、中性子/陽子比の小さい核分裂生成物2つに分裂するのに伴って、余分な中性子が2個または3個放出される。ここに、核分裂連鎖反応の可能性が見いだされた。

原爆の開発：広島・長崎

核分裂現象が発見されたのは、ナチスドイツが勢力を拡大しつつあるときで、第2次大戦直前のことだった。ウラン核分裂発見の情報は、英国、米国、ドイツ、そして日本の物理学者に『超爆弾』の可能性を想起させた。しかしながら、核分裂性を示すのは存在比0.7%しかないウラン235であること、核分裂で生じる高速中性子を減速させ核分裂を起こしやすい低速中性子にするのに時間がかかることから、原子爆弾の実現は不可能と思われた。これらの難点を克服し、原爆実現の可能性を理論的に明らかにしたのは、ドイツから英国に亡命していた物理学者フリッシュとパイエルスで、1940年3月に“*On the Construction of a "Super-bomb" based on a Nuclear Chain Reaction in Uranium*”と題する覚書を作成している。この覚書では、5kgのウラン235の塊を用いて高速中性子による核分裂連鎖反応を起こすとダイナマイト数1000トン分の爆発力が得られると見積もっている。しかし当時の英国は対独戦争に手一杯で、本格的に原爆開発を行う余裕はなかった。

米国では、ハンガリーから亡命中だった物理学者シラードが1939年8月、同じく亡命中のアインシュタインを口説いて、ルーズベルト大統領に核開発を進言する書簡を出させている。当時の米国では、イタリアから亡命中のフェルミらが、黒鉛を減速材にして天然ウランで核分裂連鎖反応を実現する研究をしていたが、原爆開発をめざす具体的な動きはほとんどなかった。米国での原爆開発を後押ししたのは、1941年7月の英国からの情報(MAUD委員会報告)で、1941年12月の真珠湾攻撃をきっかけに米国も本腰になり、1942年6月に原爆開発秘密プロジェクト“マンハッタン計画”が始まった。

原爆開発の要点は、高速中性子による核分裂連鎖反応が可能な核物質の製造にある。マンハッタン計画では、濃縮ウラン(U235)を用いる爆弾とプルトニウム(Pu239)を用いる爆弾の2種類の原爆開発が目指された。前者では、ウラン235とウラン238を選り分けてウラン235の割合を高めるウラン濃縮技術の開発、後者では、天然ウラン中のウラン238に中性子を吸収させてプルトニウム239を生成するための原子炉開発が計画成功のためのカギであった。ウラン濃縮のためには、電磁分離法、熱拡散法、気体拡散法、遠心分離法といった技術が試みられ、テネシー州オークリッジ研究所がその中心になった。原子炉については1942年12月にフェルミらが天然ウラン燃料・黒鉛原則・空気冷却による核分裂連鎖反応を達成した(シカゴパイル1)。それを受けて、ワシントン州ハンフォードにプルトニウム生産用原子炉と再処理工場が建設された。そして、ニューメキシコ州ロスアラモスには原爆組み立てのための

研究所が設立され、英国からの研究者も原爆設計に参加した。

3年の歳月と20億ドル、50万人以上の労力をかけたマンハッタン計画の結果、“Trinity”と名付けられた最初の原爆が炸裂したのは1945年7月16日、米国ニューメキシコ州の砂漠の中だった。この原爆は、中空の円球状にプルトニウムを配置し、その周囲に球対称に火薬を配置して炸裂させてプルトニウムを中心部に圧縮して連鎖反応を起こさせる爆縮型原爆であった。2番目の原爆は、1945年8月6日に広島市上空600mで炸裂した。この原爆は濃縮ウラン（U235 平均濃縮度80%）を用いた原爆で、ウランの塊を2つに分けて大砲状円筒の筒先と根元に配置し、砲弾を発射するようにして根元のウランを筒先のウランに合体させて爆発させるので、大砲型（ガンタイプ）と呼ばれる。次いで、8月9日に長崎に原爆が投下された。長崎上空500mで炸裂した原爆はTrinityと同型である。広島原爆の出力はTNT火薬に換算して16キロトン、長崎原爆は21キロトン、広島原爆は細長いので“Little Boy”、長崎原爆は丸いので“Fat Man”というニックネームが与えられている。

原発の開発：チェルノブイリ、福島

第2次大戦が終わると米国とソ連の間で冷戦がはじまり、ソ連でも、物理学者クルチャトフをリーダーとして原爆開発が本格化し、1949年8月、カザフスタンのセミパラチンスクでの最初の核実験に至った。この原爆の設計は、マンハッタン計画のスパイ情報に基づくTrinity/Fat Man プルトニウム原爆のコピーであったが、核物質製造のための原子炉、再処理工場、原爆組立工場がソ連において完成したことを示している。さらに、1952年10月には英国がオーストラリアで最初の核実験を実施した。

1953年12月、アイゼンハワー米国大統領は、国連総会で“Atoms for Peace”演説を行い、核エネルギーを平和目的に使うことを提唱した。世界で最初に原子力発電を行ったのは米国で、1951年12月にEBR-1という高速増殖実験炉が200Wの電気を発生したが、“実用”というにはほど遠かった。世界最初の原発に相当するのは、1954年6月に電気出力5000kWで運転を開始した旧ソ連のオブニンスク原発である。オブニンスク原発は、原爆用プルトニウム生産のために開発された黒鉛減速軽水冷却チャンネル型原子炉を発電炉に発展させたもので、ソ連特有のこのタイプの原発は、後に電気出力100万kWのチェルノブイリ型原発（RBMK 原発）へとつながる。

米国では当初、液体ナトリウム冷却の高速増殖炉原発の建設が試みられたが技術的困難が多くて頓挫し、民間会社を中心となって、軽水を減速材かつ冷却材とするBWR（沸騰水型原発）とPWR（加圧水型原発）の開発が進められた。PWRを開発したのはWH（ウェスチングハウス）社で、1958年6月に最初のPWRである SHIPPINGPORT 原発（電気出力5万kW）が運転を開始し、BWRについてはGE（ジェネラルエレクトリック）社が1960年6月にドレスデン原発（同18万kW）の運転を開始した。

日本での最初に原子力発電が行われたのは1963年10月26日、GE社の協力の下に茨城県東海村の日本原子力研究所に建設されたBWR 原発 JPDR（電気出力1.25万kW、1976年運転終了、解体済み）であった。一方、最初の商業用原発は英国から導入し1966年7月に運転開始した炭酸ガス冷却原発東海1号機（炭酸ガス冷却、電気出力16.5万kW、1998年運転終了、解体作業中）であったが、この型の原発は東海1号機のみである。1970年代に入ってから全国の電力会社でPWRとBWRの導入がはじまり、2011年3月に福島第1原発事故が起きたとき、日本では53基（BWR30基、PWR23基）総電気出力4808万kWの原発が運転中だった。

原子力発電がはじまった当初から、大規模な放射能放出を起こし周辺環境に破局的な被害をもたらす事態に至る可能性があるとして、以下の2つの事故が懸念された。

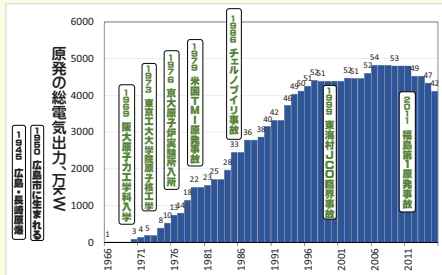
- 核分裂連鎖反応のコントロールに失敗して出力が急上昇して原子炉が破壊される出力暴走事故
- 配管破断などにもない冷却材がなくなり崩壊熱の除去に失敗して炉心熔融に至る冷却失敗事故

1986年4月に発生したチェルノブイリ原発事故は前者で、2011年3月の福島第1原発事故は後者であった。

講演では、広島・長崎原爆、チェルノブイリ原発事故、福島第1原発事故の技術的な側面についてより詳しく説明する。

広島・長崎、チェルノブイリ、福島

<自己紹介がてら：原子力と付き合って46年>



日本の原発の数と容量

今中哲二

京都大学原子炉実験所

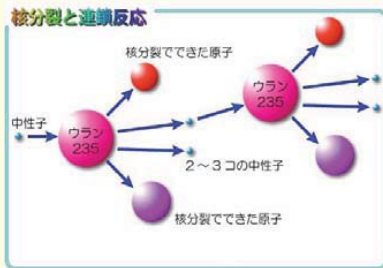
2015年12月11日

放射線・放射能、原子核・原子力研究のはじまり

- 1895 レントゲンによるX線の発見
- 1896 ベクレルによる放射能の発見
- 1897 トムソンによる電子の発見
- 1898 キュリー夫妻によるRa、Poの発見
- 1905 アインシュタインの特殊相対性理論
- 1911 ラザフォードによる原子核の実験
- 1913 ボーアによる原子モデルの提唱
- 1932 チャドウィックによる中性子の発見
- 1938 ハーン、シュトラスマン、マイトナーによるウラン核分裂の発見

2

原爆と原発



<原爆>

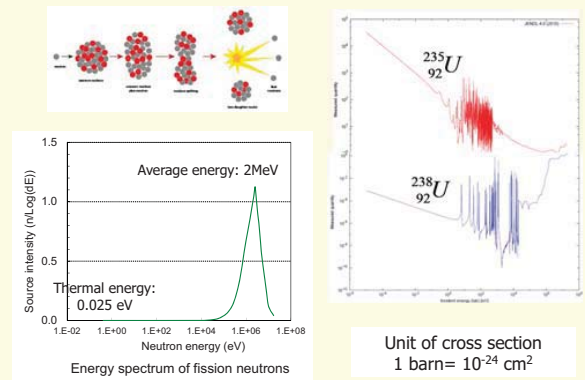
連鎖反応を瞬間的
(100万分の1秒)に行う。

<原発>

制御棒を用いて
連鎖反応を制御する。

3

中性子のエネルギーと核分裂断面積



Unit of cross section
1 barn = 10⁻²⁴ cm²

4

今日の話題

- 広島・長崎
- チェルノブイリ
- 福島

5



広島原爆

<リトルボーイ>
(長さ3m 直径0.7m 重さ4トン)

- 濃縮ウラン
- 大砲型
- 爆発力: TNT火薬16キロトン相当
- 爆発高さ: 600 m



長崎原爆

<ファットマン>
(長さ3.5m 径1.5m 重さ4.5トン)

- プルトニウム
- 爆縮型
- 爆発力: TNT火薬21キロトン相当
- 爆発高さ: 503 m

6

Little Boy

Fat Man

Little Boy:

- Uranium loaded in Little Boy: 64.15 kg
- Enrichment 80 %: ²³⁵U 51.32 kg

Fat Man:

- Plutonium loaded in Fat Man: 6.2 kg

Coste-Mullen J (2008) ATOM BOMBS: The top secret inside story of Little Boy and Fat man.

45/8/6

45/8/9

Fig. 6: Photograph of the cap of the mushroom cloud, gap between the cap and cumulus cloud at top of dust stem, dust stem, and dust pedestal for dust base of the Hiroshima explosion (National Archive).

Fig. 7: Picture of the cap of mushroom cloud, gap between the cap and cumulus cloud at the top of dust stem, and the dust stem of the Nagasaki explosion (National Archive).

Hydrodynamic simulation of Hiroshima: DS86/DS02

Updraft through center of forest
Turbulent circulation of hot gases
Cool air being drawn up into hot cloud

STLAMB simulation for Little Boy explosion. Air density contour. DS86 final report

広島原爆のキノコ雲の高さ、直径、厚み

Time after explosion (min)	Cloud center height (m)	Horizontal radius (m)	Vertical radius (m)
0	0	0	0
2	2000	1000	1000
4	4000	2000	2000
6	6000	3000	3000
8	8000	4000	4000
10	10000	5000	5000
12	12000	6000	6000
14	13000	7000	7000
16	13500	8000	8000
18	13000	9000	9000
20	12000	10000	10000

Fig.6 A-bomb cloud formation when there are the same parameters as Little Boy: HOB; 600 m, 16 kt.

広島 1945年8月6日

当時の人口:
- 市民 30万人
- 軍人 4万人

原爆で壊滅した広島

原爆の威力:熱線

広島 2 km



長崎 3.5 km



13

原爆の威力:熱線

長崎 2 km



広島:距離不明



14

原爆の威力:爆風



広島 250 m

15

原爆の威力:放射線

脱毛



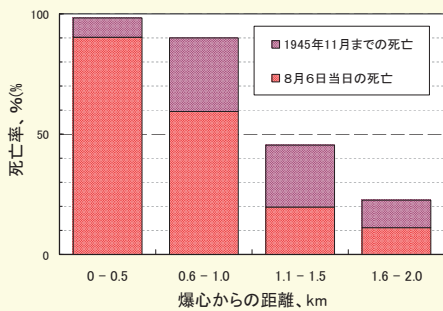
紫斑と出血
広島1 km



19 顔面に見われた皮下出血。8月18日脱毛がはじまり、29日鼻出血、皮下出血、出血、31日発熱、9月1日吐瀉、嘔吐、苦しい出血傾向、9月3日死亡(広島、爆心地から1.0km、1945年9月3日、広島第一陸軍病院宇品分院)。(撮影:影葉正男・木村肇一)

16

爆心から2km以内の死亡率:広島



(2km以内の平均死亡率) = 56.5 %

17

1945年末までの死者数

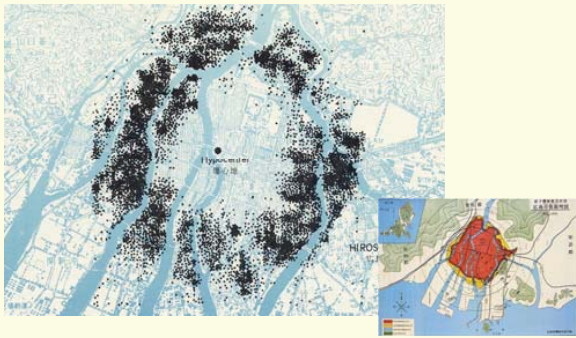
	人口 (1945年8月)	死者の数
広島	≈ 34万人	≈ 14万人 (41%)
長崎	≈ 22万人	≈ 7万人 (32%)
合計	≈ 56万人	≈ 21万人 (38%)

18

被爆生存者追跡調査

Life Span Study 1950~

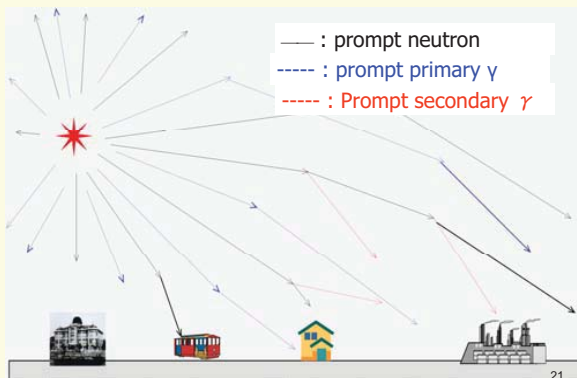
調査対象者の被爆位置：広島 ABCC-TR 7-67 (1967)



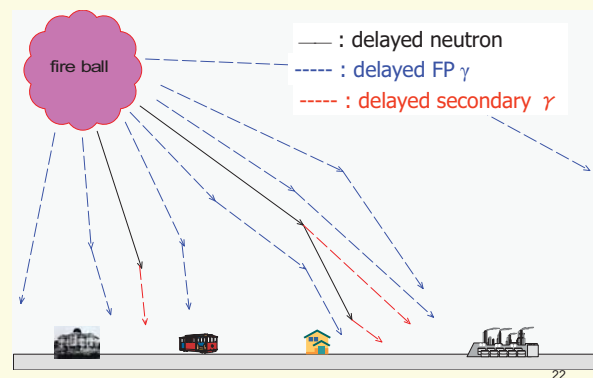
原爆放射線の分類

- 初期放射線 initial radiation
 - 即発放射線 prompt radiation
 - 即発ガンマ
 - 即発中性子
 - 即発2次ガンマ
 - 遅発放射線 delayed radiation
 - 遅発ガンマ (FPガンマ)
 - 遅発中性子
 - 遅発2次ガンマ
- 残留放射線 residual radiation
 - 誘導放射能
 - Local fallout (黒い雨)

即発放射線 Prompt radiation



遅発放射線 Delayed radiation

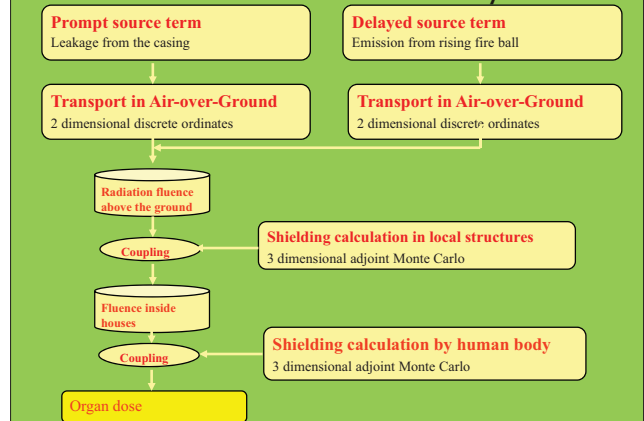


原爆による放射線被曝

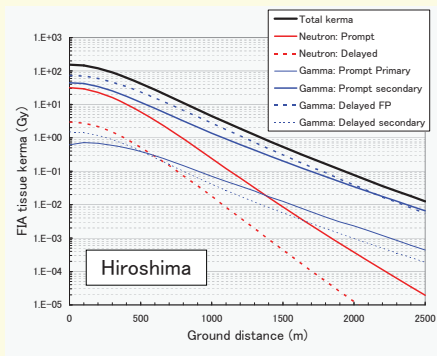
<初期放射線>	Time scale	寄与度
- 即発 -		
Prompt primary γ	< μ sec	○
Prompt neutron	< msec	○
Prompt secondary γ	< 0.1sec	◎
- 遅発 -		
Fireball FP γ	< 30 sec	◎
Delayed neutron	< 10 sec	小
Delayed secondary γ	< 10 sec	小

<残留放射線>	Time scale	寄与度
誘導放射能	< weeks	△
フォールアウト (黒い雨)	< months	?

Scheme of DS02 calculation system

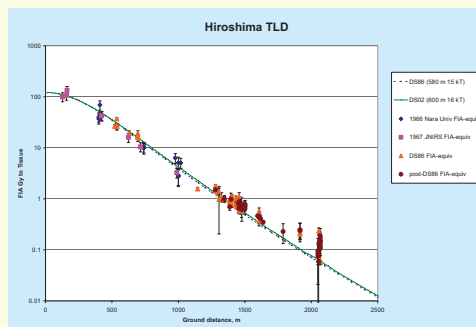


DS02: 地上 1 m での無遮蔽放射線量



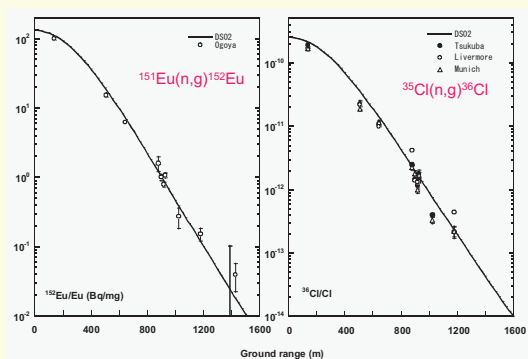
25

広島ガンマ線量：計算値とTL測定値



Cullings, DS02 report (2005) 26

中性子放射化量：計算値と測定値



Hoshi et al, DS02 report (2005) 27

広島・長崎被爆生存者追跡調査

- Life Span Study (LSS) by Radiation Research Foundation (RRF)

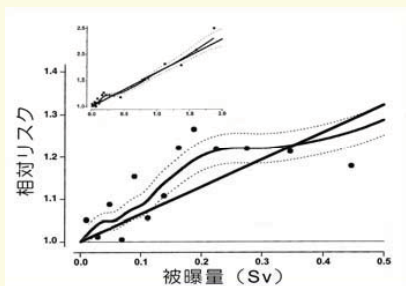
	Number of survivors (1950 Census)	Life Span Study Cohort (1950)		
		Exposed	Not-exposed	Total
Hiroshima	159,000	62,000	20,000	82,000
Nagasaki	125,000	32,000	6,000	38,000
Total	284,000	94,000	26,000	120,000



28

被曝にともなうガン死リスクの見積もり

広島・長崎の被爆生存者のガン死追跡データ



50ミリシーベルト以下(0.05シーベルト以下)の影響は、直接的には分からない。

#29

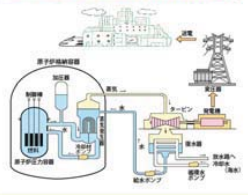
今日の話

- 広島・長崎
- チェルノブイリ
- 福島

30

原発の危険性

加圧水型炉(PWR)原子力発電のしくみ



●広島・長崎原爆では約1kgのウランやプルトニウムが核分裂を起こした。

●100万kWの原発では1日に約3kgのウランが核分裂を起こす(1年で約1000kg)。

原発大事故 その1：核分裂の制御に失敗する。

原発大事故 その2：原子炉の冷却に失敗する。

31

原発事故がとんでもない規模になることははじめから分かっていた

原発事故の災害規模(日米での災害評価とチェルノブイリ事故)

	日本原産会議報告 (1960)	米国ラスマツセン報告 (1975)	チェルノブイリ事故 (1986)
電気出力	16万kW	100万kW	100万kW
放射能放出量	1000万キュリー	5億キュリー	4.5億キュリー
急性死者	540人	3300人	公称 31人
急性障害	2900人	4万5000人	公称 100人余り
永久立退き人数 または面積	3万人	750平方km	約40万人 約1万平方km
農業制限・除染面積	3万6000平方km	8300平方km	約3万平方km
損害評価額	約1兆円	4.2兆円	約50兆円?
当時の日本の国家予算	1.7兆円	21兆円	54兆円

32

ついに起きた最悪の事態

1986年
4月26日
午前1時23分49秒

チェルノブイリ原発4号炉
が爆発炎上



Чернобыльский репортаж (1988)

33

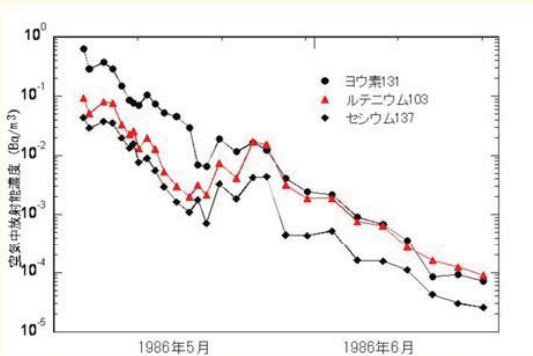
最悪事故 炉心が溶融



1986年
4月30日
朝日新聞

34

日本に飛んできた放射能(大阪府熊取町)



35

チェルノブイリ原子力発電所



(2) 原子力数・出力

機組	出力 (万kW)
1号機	1600
2号機	1600
3号機	1600
4号機	1600
5号機	1600
6号機	1600

(3) 所有者・運営者

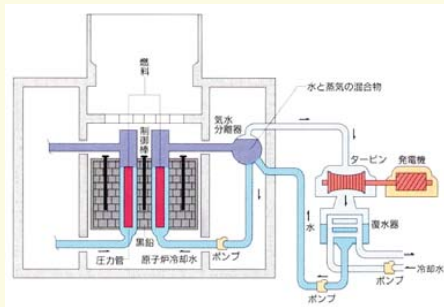
発電会社 (Ministry of Power and Electrification)



建設中のチェルノブイリ原子力発電所

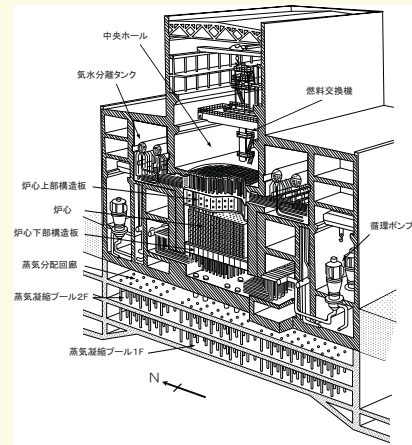
36

チェルノブイリ型原発 RBMK炉



<黒鉛減速・軽水沸騰冷却・チャンネル型> 37

RBMK炉 断面図



RBMK炉中央ホール イグナリーナ2号炉



燃料交換機



RBMK炉の特徴

<長所>

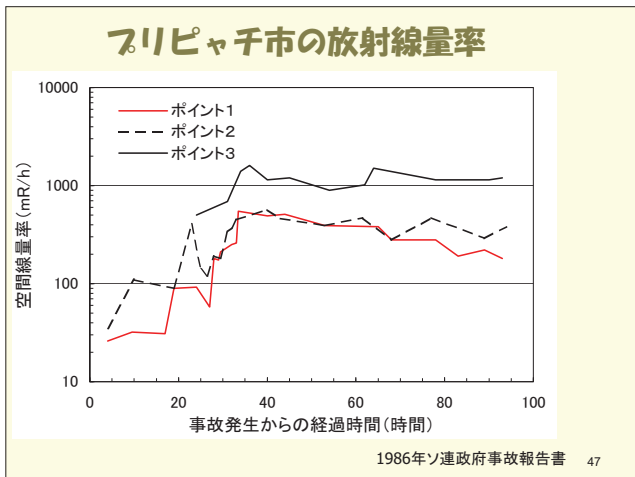
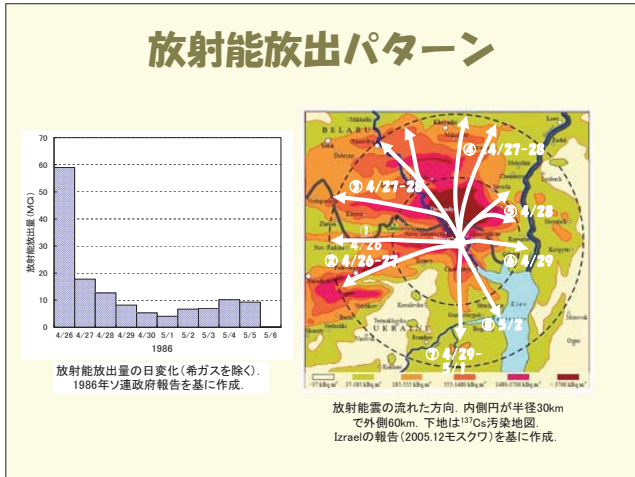
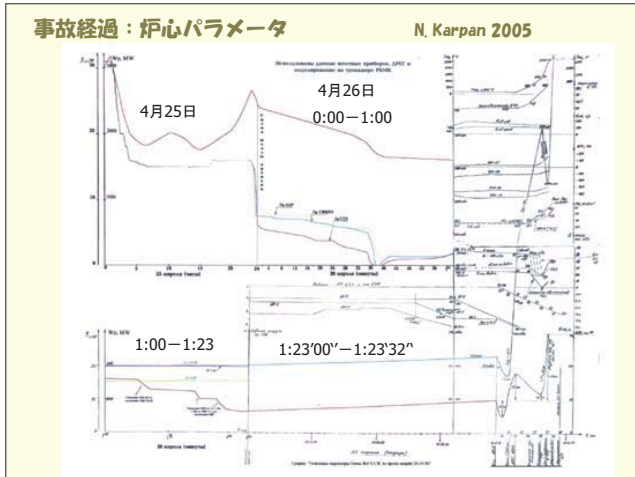
- 運転しながら燃料交換が可能(原爆用プルトニウムを製造できる)
- 圧力管の数を増やし大出力化が容易
- 軽水炉圧力容器のような大重量機器がなく、内陸立地が容易

<欠点>

- 炉心が大きく、出力制御が複雑
- ポイド反応度係数がプラス(炉心で泡が増えると出力が上昇する)
- 制御棒の構造に欠陥(極端な条件のときに制御棒を入れると出力が上昇する)

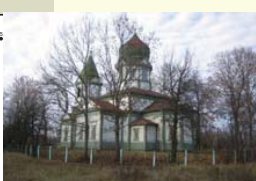
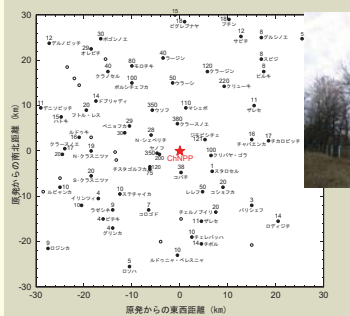
その前日

- 4月25日午前1時、保守点検のため運転開始('83.12)以来はじめての原子炉停止作業に入った。
 - 原子炉停止に合わせて、タービン振動測定などいくつかの試験が予定されていた。
 - その中のひとつに、原子炉停止後のタービン慣性回転を非常電源に用いる「電源テスト」があった。
- 4月25日午前3時47分、出力1600MW(定格の50%)
- 4月25日午後2時、キエフの給電司令所の要請により、50%運転を継続
- 4月25日午後11時、出力降下作業を再開
- 4月26日午前0時、運転班交代



プリピャチ市以外の農村地帯は、何も知らされず、放ったらかしにされていた

30km圏の放射線量率：5月1日、mR/h



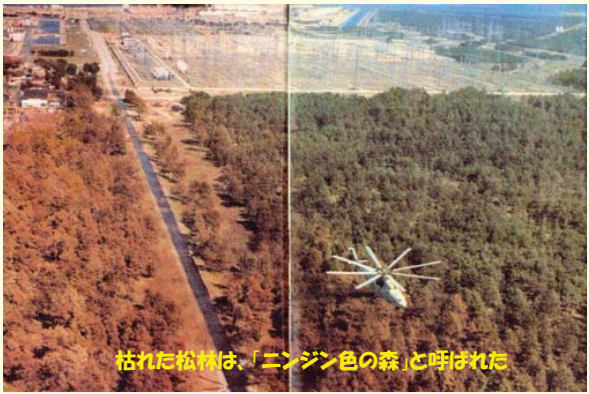
2005年10月のクラスノエ村

Balfra 1996

1週間後から30km圏住民の避難がはじまった

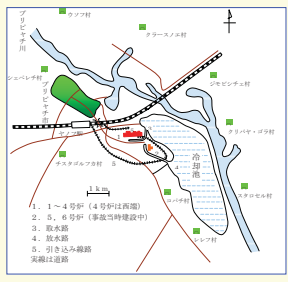


事故処理：放射能で枯れた森



枯れた松林は、「ニンジン色の森」と呼ばれた

チェルノブイリ原発周辺10km



プリピャチ市より 2005年10月

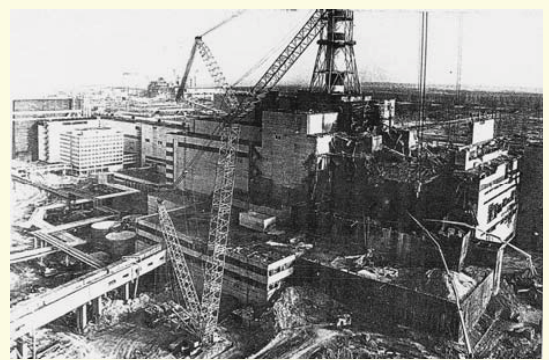
石棺の建設



We cleaned the roof, because you needed to cover the sarcophagus,

ビデオ「ザ・サクリファイス」より 53

石棺の建設



バイオロボット：飛び散った原子炉の片づけ



55

チェルノブイリ4号炉の「石棺」



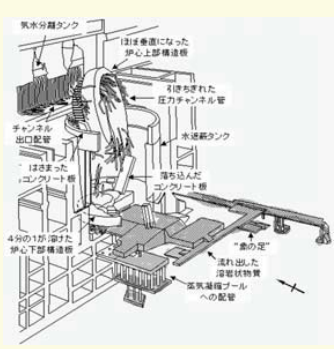
4号炉制御室と循環ポンプ室



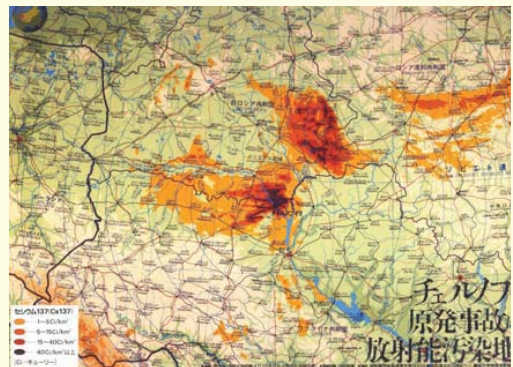
忘れがたい光景：30km圏廃材置き場
2000年3月 毎日新聞大島記者撮影



炉心は空っぽだった



3年たって明るみに出た放射能汚染
—チェルノブイリ周辺セシウム137汚染地図—



60

セシウム137による汚染面積

被災3カ国の法令によると：

- 148万ベクレル/m²以上：強制避難ゾーン。
- 55.5万～148万ベクレル/m²：強制(義務的)移住ゾーン。
- 18.5万～55.5万ベクレル/m²：希望すれば移住が認められるゾーン。
- 3.7万～18.5万ベクレル/m²：放射能管理が必要なゾーン。

国名	セシウム137の汚染レベル、ベクレル/m ²				
	3.7万～18.5万	18.5万～55.5万	55.5万～148万	148万以上	3.7万以上合計
ロシア	48,800	5,720	2,100	300	56,920
ベラルーシ	29,900	10,200	4,200	2,200	46,500
ウクライナ	37,200	3,200	900	600	41,900
合計	115,900	19,120	7,200	3,100	145,320

汚染地域面積：14.5万平方km (本州の約6割)
 移住対象地域面積：約1万km² (福井県+京都府+大阪府)

一般の人々に多くの放射線障害があった -1992年に暴露されたソ連共産党秘密文書-

ソ連共産党中央委員会に報告されていた病院収容者の数

1986年5月4日 病院に収容された者1882人。検査した人数全体は3万8000人。さまざまなレベルの放射線障害が現れた者 204人、うち幼児 64人、18人重症。

5月7日 この1日で病院収容者1821人を追加。入院治療中は、7日10時現在、幼児1351人を含め4301人。放射線障害と診断されたもの520人、ただし内務省関係者を含む。重症は34人。

5月13日 この1日で443人病院収容。908人が退院。入院中は9733人で、うち子供4200人。放射線障害の診断は、子供37人を含む299人。

5月28日 入院中5172人で、放射線障害は182人(うち幼児1人)。この1週間で1人死亡。これまでの死亡者は22人。

62

チェルノブイリ事故の被災者

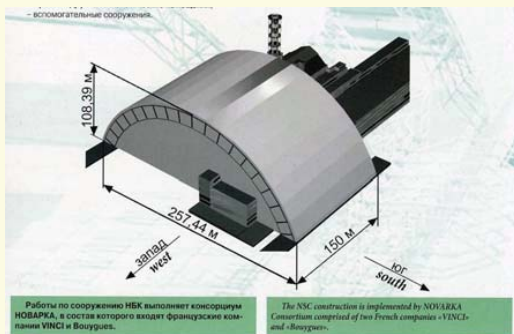
- ◇運転員と消防士たち 1000～2000人
- ◇事故処理作業従事者 60～80万人
- ◇事故直後の避難住民 約12万人
- ◇高汚染地から移住者 約25万人
- ◇汚染地域居住者 約600万人

63

事故の原因:いろいろな説

- 1986年ソ連報告：運転員による数々の規則違反の組み合わせ
 - 出力増加に気づいてAZ-5を押したが間に合わなかった
- 1991年シテインベルグ報告：原子炉の構造的欠陥
 - AZ-5を押したことで事故がはじまった
- 運転員無能説
 - 爆発が起きてはじめて異常に気づいた
- 地震原因説
- CIA陰謀説

第2石棺の建設



チェルノブイリ新石棺建設現場

チェルノブイリの調査から 学んだこと

- 原発で大事故がおきると周辺の人々が突然に家を追われ、村や町がなくなり地域社会が丸ごと消滅する
- 原子力の専門家として私に解明できることは、事故被害全体のほんの一側面に過ぎず、解明できないことの方が圧倒的に大きい

今日の話

- 広島・長崎
- チェルノブイリ
- 福島

68

2011年3月28-29日 飯舘村放射線状況調査

〈メンバー〉

- 今中哲二
- 遠藤 暁
- 小澤祥治
- 菅井益郎



協力 飯舘村役場

飯舘村放射線サーベイチーム2011.3.29

69

2011年3月29日の飯舘村調査 長泥曲田 30 $\mu\text{Sv/h}$

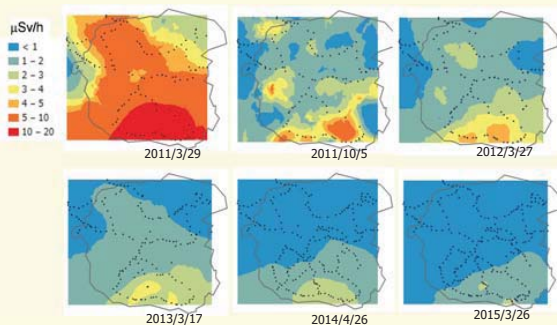


このような放射能汚染の中で、飯舘村の人々は普通に暮らしていた！

どうやら、福島の原子炉と期を同じくして、日本の原子力防災システムもメルトダウンしていたようだ！

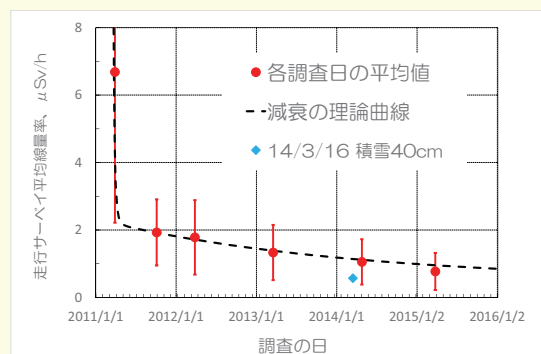
70

飯舘村の4年間の走行サーベイデータ 車内放射線量率の推移



71

この4年間の飯舘村調査(2) 調査車内の平均放射線量の推移



もうすぐ5年 飯館村のいま



2015年3月26日 今中撮影

人口6000の村の除染に毎日
7500人の作業員...

除染という名の環境破壊！



73



2014/11/01

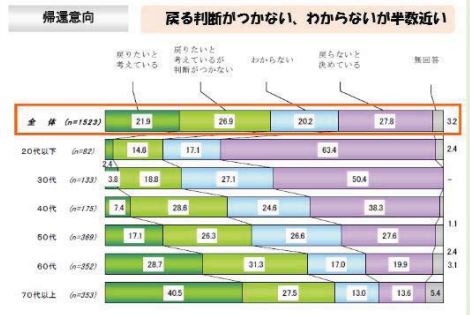


福島県相馬郡飯館村
面積：230平方km
人口：約6000
戸数：（事故前）約1700
（現在）約3100

昨年秋、飯館村で除染作業をやっている人は、毎日7500人だそうだ。一人1日当たりの諸経費を5万円とすると、毎日3億7500万円となる。1年300日として約1000億円となる。飯館村全体の除染費用だけで3000億円というのは“ホントの話”の気がしてきた。

村民意向調査 飯館村役場平成25年4月

帰還意向（村民アンケート）



76

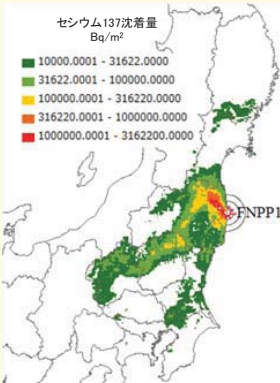
今も続く避難

避難対象の面積：
約1000平方km
避難している人：
約12万人



77

日本も“放射能汚染と向きあう時代”になった



東京都から岩手県まで本州のかなりの部分で“無視できないレベル”のセシウム137汚染が生じた。

セシウム137の汚染が1平方m当り1万ベクレル以上の面積は約2万5000平方km.

78

汚染地域で暮らすとは

- 余計な被曝はしない方がいい
- ある程度の被曝は避けられない

この相反する2つのことに
どう折り合いをつけるか！

放射能汚染が余計なものである以上、私たちには「1ベクレル、1マイクロシーベルトたりとも汚染はイヤだ」という権利がある。そして、東京電力と日本政府は、私たちの選択を面倒みる責任がある。

79

福島後の時代

結局、私たちは
どこまでの被曝をがまんするのか？
一般的な答はない

<参考>

- 原子力施設からの一般公衆の線量限度：年間1ミリシーベルト
- 放射線作業従事者の線量限度：年間20ミリシーベルト
- 自然放射線による年間1ミリシーベルトの被曝を受けている
- 「年1ミリシーベルト」が、ガマンの目安を考えるときの出発点であろう

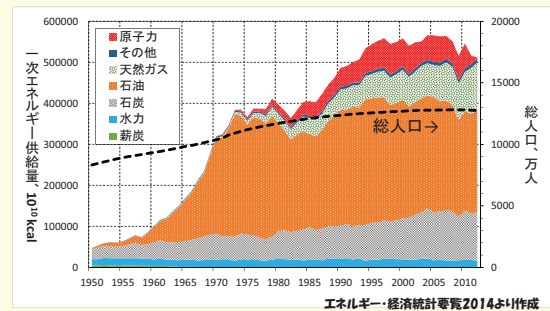
子供は感受性が大きく、将来がある！！
子供の被曝はできるだけ少なくすべきである！！

個人として言いたいこと

- 避難区域の除染政策を見直し、お金の使い方を考え直すべきだ！
- 日本に住んでいる人全部についての被曝量評価を行い、しかるべき健康追跡調査を、国の責任で行うべきだ！
- 行政の意志決定や政策実行に係わる人々、つまり役人に間違いや不作為があった場合には、ヒアリングを行い、個人責任を問うシステムが必要だ！

81

日本のエネルギー需要の変遷



何がホントに大事なのかももう一度考えてみよう

ご静聴ありがとうございました！

82

京都大学原子炉実験所における放射性廃棄物の現状について

放射性廃棄物処理部 井本明花

1.はじめに

現在、京都大学原子炉実験所(以下「実験所」と呼ぶ。)内で発生している放射性廃棄物は、核燃料物質および原子炉等規制法(以下[炉規法]と呼ぶ。)と放射線障害防止法(以下「障防法」と呼ぶ。)の2種類に分類できる。

炉規法に基づく放射性廃棄物は、主に KUR、KUCA など核燃料物質を取り扱っている施設から発生しており、それらは固形廃棄物倉庫(図 1、図 2)に一時保管している。

障防法に基づく放射性廃棄物は、主にホットラボやイノベーションラボなど RI を取り扱っている施設から発生しており、それらは日本アイソトープ協会(以下「RI 協会」と呼ぶ。)に引渡している。

2.障防法に基づく放射性廃棄物について

一昨年、昨年度及び今年度の、RI 協会へ引き渡したドラム缶(50L)の本数を表 1 に示す。

表 1.RI 協会引き渡したドラム缶の種類及び本数(単位:本)

	可燃性 ドラム缶	難燃性 ドラム缶	不燃性 ドラム缶	非圧縮性 ドラム缶	合 計
平成 24 年度	11	28	15	4	58
平成 26 年度	78	142	49	59	328
平成 27 年度	15	60	4	95	174

平成 26 年度は、一昨年と比べて劇的に引き渡しているドラム缶の本数が増えていることがわかる。平成 27 年度は平成 26 年度より少ないもの、それでも引き渡しているドラム缶の本数は、平成 24 年度よりも多いことが分かる。

このような結果になった背景として、平成 25 年から始まったトレーサー棟の耐震・改修工事が上げられる。平成 26 年度は、その工事で発生したコンクリート破片や養生シート・作業時に使用したゴム手袋が、内訳の大半を占めている。

平成 27 年度も、トレーサー棟の耐震・改修工事が再開したこと、平成 26 年度の引渡しで引き渡すことが出来なかったドラム缶 50 本分も含まれているため、このような数値となっている。

引渡については、放射線管理部の立会の下行っている。表面線量が高い放射性廃棄物については、引渡日当日でも線量・核種を測定している。

3.炉規法に基づく放射性廃棄物について

固形廃棄物倉庫には、炉規法で定められた放射性廃棄物が、2015 年 11 月現在 50L ドラム缶で 47 本、200L ドラム缶で 111 本収納・保管している。

主な内容物は、使用済みのイオン交換樹脂、耐震工事で発生したガラ、凝集沈殿処理で発生した放射性核種を吸着した沈殿物である。(以下「汚泥」と呼ぶ。)

汚泥は、凍結再融解処理で脱水した後ヒーターで乾燥したものを、ドラム缶に収納されている。それが2010年まで1年につき約1本~2本のペースで増加していた。しかし耐震工事等により放射性廃棄物が増加しており、固形廃棄物倉庫の収容できるスペースが少なくなっている。そこで以前から1段から2段に積み上げるなど配置を工夫していたが、それでもスペース確保に限界が来ているため、新固形廃棄物倉庫の建設が来年度予定されている。



図 1.固形廃棄物倉庫 外観



図 2.固形廃棄物倉庫 内部

4.終わりに

放射性廃棄物を取り巻く環境は年々厳しくなっている。障防法に基づく放射性廃棄物のうち、 α 線核種について、RI協会は現在事業を停止するのが確定した事業所についてのみ引き取るという状況である。すなわち、本実験所は、引き取ってもらうことは出来ない状態である。

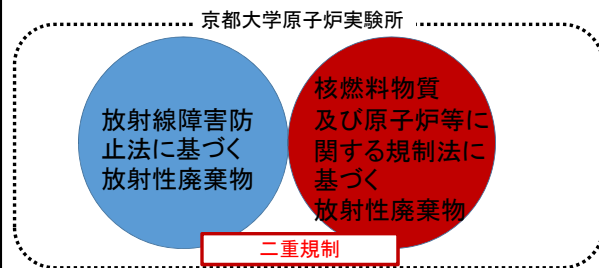
炉規法に基づく放射性廃棄物は、新たに固形廃棄物倉庫を建設するとはいえ、その倉庫の容量にも限界がある。

それらの事を踏まえて、できる限り無駄な放射性廃棄物を増やさない努力が重要である。

京都大学原子炉実験所 における放射性廃棄物の 現状について

放射性廃棄物処理部 井本明花

本実験所における放射性廃棄物の 扱い



核燃料物質及び原子炉等に関する 規制法(炉規法)に基づく放射性廃棄物

- 主にKUR,KUCAなど核燃料物質を取り扱っている施設から発生する放射性廃棄物を指す。
- これらは“**固形廃棄物倉庫**”に一時保管している。



放射線障害防止法(障防法)に基づく 放射性廃棄物

- 主にホットラボやトレーサー棟などRIを取り扱っている施設から発生している放射性廃棄物を指す。
- それらは“汚染物貯蔵庫”に一時保管している。
- 年に1回、日本アイソトープ協会(RI協会)に引き渡している。

※日本アイソトープ協会:国から認可を受けた放射性廃棄物の引取業者

汚染物貯蔵庫

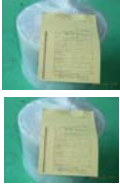


広さ300㎡(貯蔵庫部分の面積は270㎡)

RI廃棄物の分類

分類	可燃性	難燃性	不燃性	非圧縮性不燃物
内容物	紙、布製品	ゴム手袋・養生シート	金属、試験管などのガラス製品、坩堝などの瀬戸物	コンクリート破片などの建築廃材、機械機器など

RI廃棄物発生の流れ



この時点ではRI廃棄物とは言わない



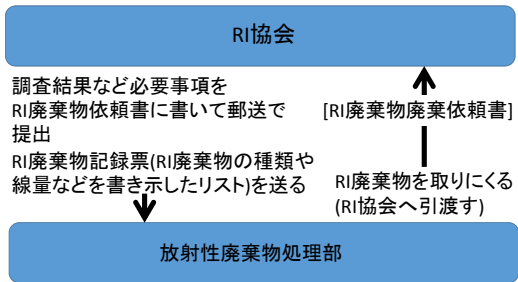
ドラム缶に収容して初めて放射性廃棄物といえる。

障防法に基づく放射性廃棄物の一時保管

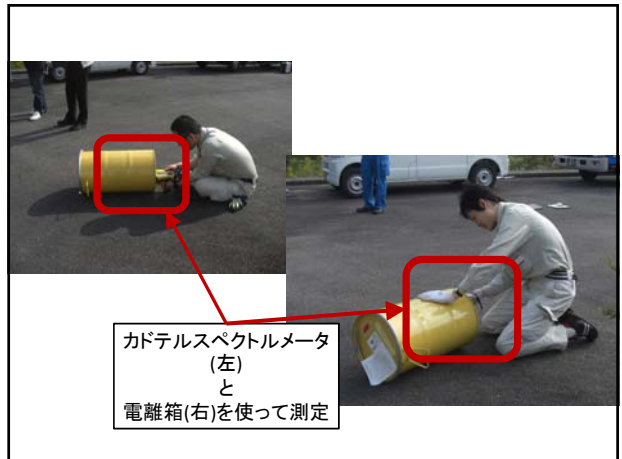


項目	内容
発注番号	0528-7224
品名	RI廃棄物
数量	1
単位	ドラム缶
備考	
発注先	RI協会
発注日	2013/08/14
発注時間	15:00
発注場所	RI協会
発注者	伊予銀行
発注部署	環境衛生課
発注担当者	伊藤
発注連絡先	090-8500-1111
発注メールアドレス	ri@ri-kyoai.jp
発注パスワード	RI協会
発注用紙	RI協会
発注用紙番号	RI協会
発注用紙発行日	2013/08/14
発注用紙発行時間	15:00
発注用紙発行場所	RI協会
発注用紙発行人	伊藤
発注用紙発行部署	環境衛生課
発注用紙発行担当者	伊藤

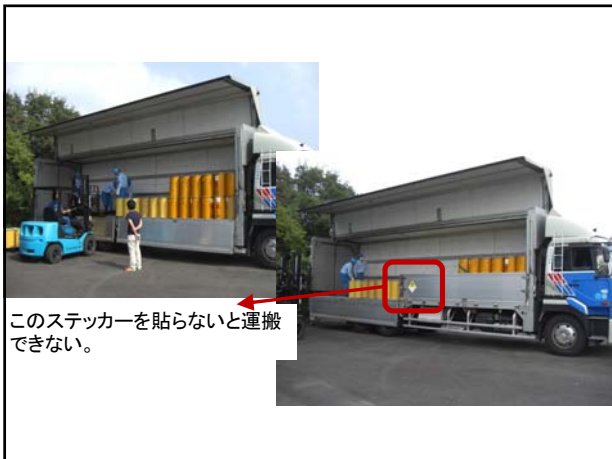
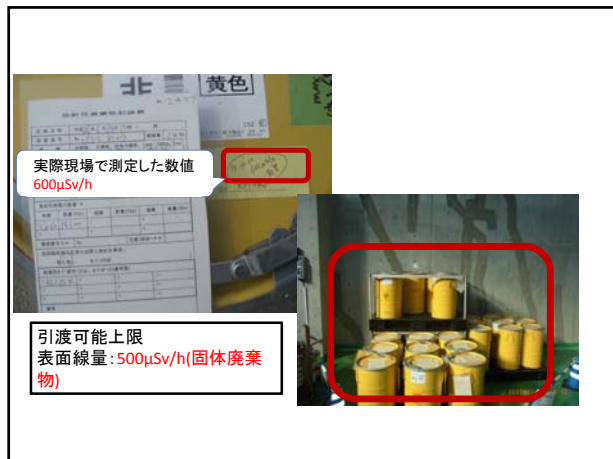
RI協会引渡し作業(書類等含む)一連の流れ



今年度引取予定のドラム缶群



カドテルスペクトルメータ(左)と電離箱(右)を使って測定



近年のRI協会への引渡状況

	可燃性 ドラム缶	難燃性 ドラム缶	不燃性 ドラム缶	非圧縮性 ドラム缶	合計
平成24年度	11	28	15	4	58
平成26年度	78	142	49	59	328
平成27年度	15	60	4	95	174

平成25年度は諸事情により引渡が出来なかったため、平成25年度と平成26年度の2年分をRI協会へ引き渡している。
平成26年度にトレーサー棟の耐震工事が開始したのもこの年から

炉規法に基づく放射性廃棄物の現状

- 固形廃棄物倉庫には炉規法で定められた放射性廃棄物が2015年11月現在200Lドラム缶で111本収納・一時保管している。
- 固形廃棄物倉庫は大きさ(15.2m × 6.20m)である。
- 今現在引き取ってくれる業者がないのが現状である。



固形廃棄物倉庫に一時保管されているもの

- 蒸発濃縮処理装置で発生した濃縮廃液を乾燥させたもの
- 原子炉施設内の工事で発生したコンクリート破片などの建築廃材
- 使用済みイオン交換樹脂

炉規法に基づく放射性廃棄物の一時保管



放射性廃棄物記録簿 No. 115

記録簿番号	平成26年12月26日現在		
記録簿名称	放射性廃棄物記録簿	記録簿区分	放射性廃棄物
所在地	福島県福島市		
保管場所	放射性廃棄物貯蔵庫		
保管内容	放射性廃棄物		
保管数量	数量	単位	備考
1	100	個	
2	100	個	
3	100	個	
4	100	個	
5	100	個	
6	100	個	
7	100	個	
8	100	個	
9	100	個	
10	100	個	
11	100	個	
12	100	個	
13	100	個	
14	100	個	
15	100	個	
16	100	個	
17	100	個	
18	100	個	
19	100	個	
20	100	個	
21	100	個	
22	100	個	
23	100	個	
24	100	個	
25	100	個	
26	100	個	
27	100	個	
28	100	個	
29	100	個	
30	100	個	
31	100	個	
32	100	個	
33	100	個	
34	100	個	
35	100	個	
36	100	個	
37	100	個	
38	100	個	
39	100	個	
40	100	個	
41	100	個	
42	100	個	
43	100	個	
44	100	個	
45	100	個	
46	100	個	
47	100	個	
48	100	個	
49	100	個	
50	100	個	
51	100	個	
52	100	個	
53	100	個	
54	100	個	
55	100	個	
56	100	個	
57	100	個	
58	100	個	
59	100	個	
60	100	個	
61	100	個	
62	100	個	
63	100	個	
64	100	個	
65	100	個	
66	100	個	
67	100	個	
68	100	個	
69	100	個	
70	100	個	
71	100	個	
72	100	個	
73	100	個	
74	100	個	
75	100	個	
76	100	個	
77	100	個	
78	100	個	
79	100	個	
80	100	個	
81	100	個	
82	100	個	
83	100	個	
84	100	個	
85	100	個	
86	100	個	
87	100	個	
88	100	個	
89	100	個	
90	100	個	
91	100	個	
92	100	個	
93	100	個	
94	100	個	
95	100	個	
96	100	個	
97	100	個	
98	100	個	
99	100	個	
100	100	個	

経年劣化で文字が読みにくくなるのを防ぐためにラミネート加工をしている。

問題点

- 固形廃棄物倉庫のスペース不足

対策: ドラム缶を1段から2段に積み上げるなど配置を工夫してきた

それでもスペース確保をするのが難しくなってきた

来年度に新固形廃棄物倉庫を建設予定

最後に

- 放射性廃棄物を取り巻く環境は年々厳しくなっている。
障防法に基づく放射性廃棄物のうち、α線核種について、RI協会は現在事業を停止するのが確定した事業所のみ引き取るというスタンスである。すなわち、本実験所は、引き取ってもらうことは出来ない状態である。

過去引取可能だったのが現在引取不可能になったものの一覧
スラリー(おかゆ)状の放射性廃棄物

減容装置で処理した放射性廃棄物

最後に

- 炉規法に基づく放射性廃棄物は、新たに固形廃棄物倉庫を建設するとはいえその倉庫の容量にも限界がある。
- できる限り放射性廃棄物を増やさない努力が重要である。

KUR 重水設備からの重水漏えいの対策と現状について

京大炉技術室 吉永尚生

1. はじめに

平成 27 年 1 月に発生した京大炉（KUR）の重水設備における重水漏洩事象に関して、復旧完了までの経緯および今後の対策について報告する。

2. 漏洩発見から復旧までの対応

2. 1 設備に係わる経緯と復旧作業

(1) 漏洩の発見

平成 27 年 1 月 18 日午前、図 1 に示すように KUR の炉室地下室にて漏水が発見され、同日の調査により漏洩した液体が重水であることが判明した。その後、重水設備のスペクトルシフタ 3 層および水シャッター層の計 4 層の重水を地下ストレージタンクに排水した後、漏水率が低下したため、重水設備からの漏洩であることが分かった。照射室内の重水給排水系付近を確認したところ、床面より 50 cm 程下にある H 鋼に水分が発見された。採取してトリチウム濃度を確認したところ、重水であることが判明した。この際、漏洩箇所および漏水の形跡のある場所は確認できなかった。

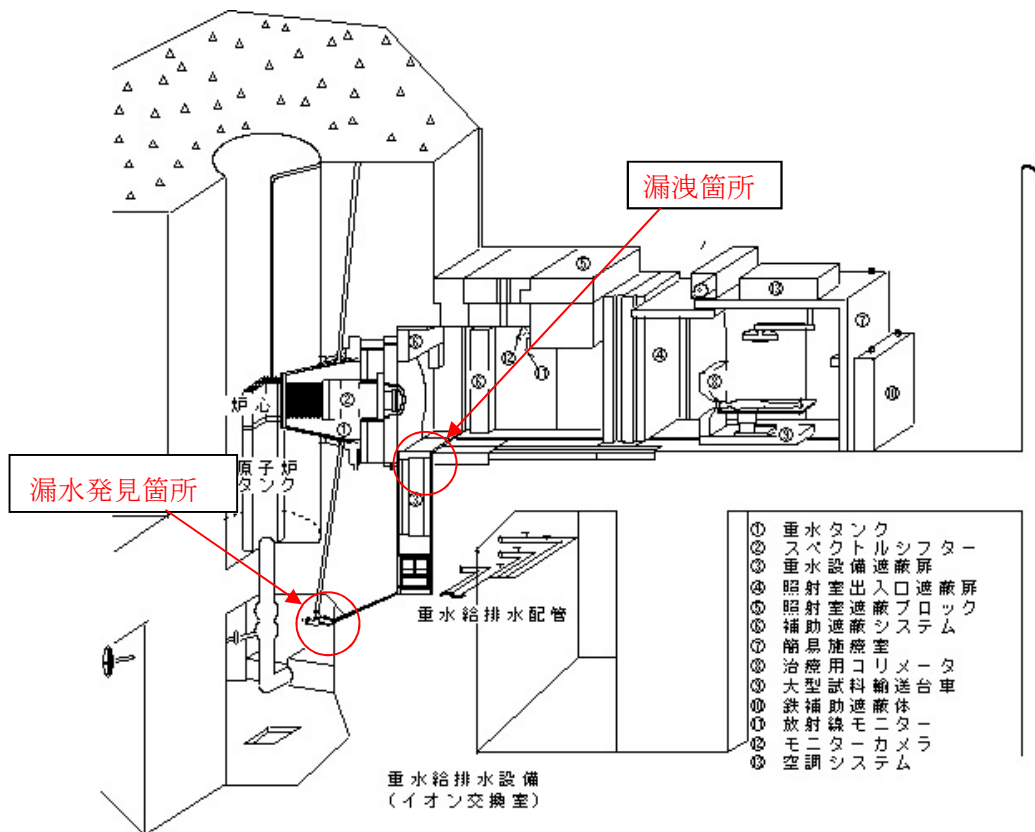


図 1 重水設備概観

(2) 漏洩箇所の特定

2月2～3日、漏洩箇所の特定作業および補修作業をしやすいするために、照射室および遮蔽扉の解体作業を行った。以降、漏洩箇所の特定作業を進め、2月6日に照射室内の重水給排水配管のうちスペクトルシフタ①系統のステンレス製フレキシブル配管の下部フランジ接合部から微量の重水の滲みを確認し、漏洩箇所の一つとして特定した（写真1および2）。

2月20日に当該フランジを分解し、ステンレス製フランジおよび金属ガスケット（Uタイトシール）の状態を確認した。分解作業に先立って、重水給排水系のカバーガス（ヘリウム）の放出を行った。この際、炭酸カリウム（ K_2CO_3 ）水溶液トラップを用いて、放出されたガス中のトリチウム等の放射性物質を回収した。トラップ通過後のガスは、ガスサンプリングバックに入れて保管した。また、フランジ分解作業時は、漏洩するガスの吸入を防ぐために、作業場所の換気を良くし、フランジの上方に人がいないように配慮すると共に、フランジの解放時に出てくる重水水滴は、飛散ないようにウエス等で受けた。作業中においてはトリチウムモニタを作動させ、作業場所近傍の空気中トリチウム濃度を常時監視した。

フランジを分解したところガスケットに腐食が認められ、これが重水漏洩の原因であると判断された（写真3および4）。なお、フランジ面には酸化物などの付着があったが、腐食などは認められなかったため、フランジ面を清掃し、一時的な措置として樹脂製ガスケットを用いてフランジを再接続した。

2月24日、他の漏洩箇所の有無を調べるため、ヘリウムガスを用いた加圧テストを行い、設備全体のフランジ部およびバルブ類などの接合箇所から漏洩がないことを確認した。この結果、今回の重水漏洩箇所は、重水の滲みが確認されたスペクトルシフタ①系統のフランジ接合部のみであるという結論に至った。

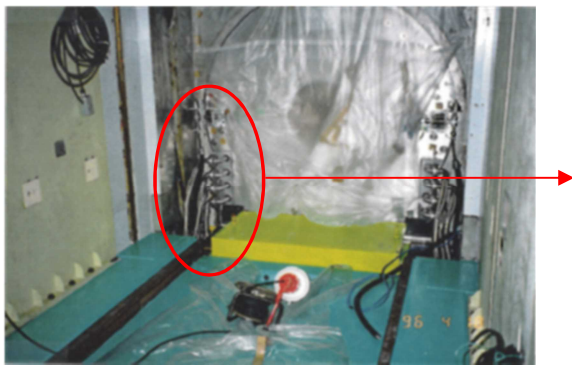


写真1 重水設備照射室内

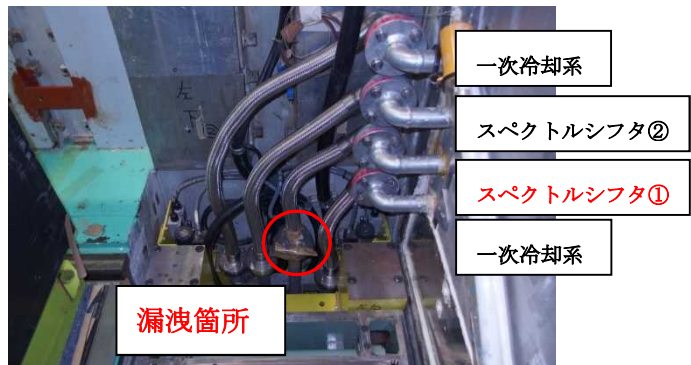


写真2 重水漏洩箇所



写真3 漏洩箇所のステンレス製フランジ

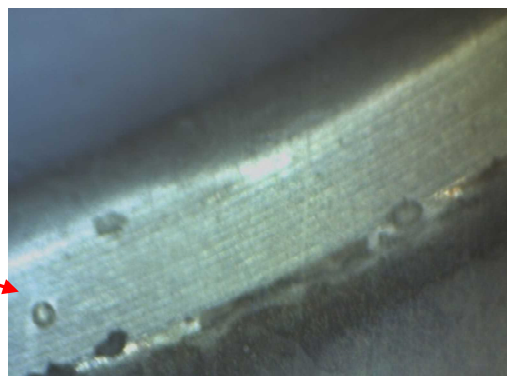


写真4 金属ガスケットの腐食状況

(3) 配管の健全性調査

3月20日、漏洩箇所以外のフランジ接合部の健全性を調査するため、照射室内の他の重水給排水系のフランジ接合部の分解点検を行った。その結果、ステンレス製フランジには腐食は見られなかったが、重水設備側のアルミ製フランジのいくつかに微小な腐食部分があることが確認された（写真5および6）。また、4月16日に、重水給排水系統のステンレス製フレキシブル配管の清掃と漏洩検査を行い、フレキシブル配管が健全であることが確認された。

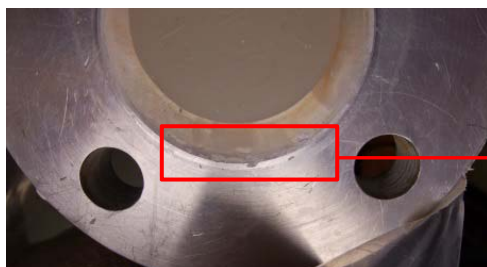


写真5 アルミニウム製フランジ



写真6 腐食部の拡大

(4) アルミ製フランジの補修

4月21～24日、アルミ製フランジ面の清掃を行い、腐食部分の詳細な観察を行った。その結果、重水給排水6系統のうち、3系統（スペクトルシフタ3系統）のアルミ製フランジの腐食部分の補修と金属ガスケットの交換を行うことが決定された。他の3系統（重水タンク、水シャッター、オーバーフロー）については、堆積物の付着が確認されたものの、ガスケット当たり面にはほとんど腐食が見られなかったことから、堆積物の除去と金属ガスケットの交換が行われた。

5月11～20日、重水給排水系のアルミ製フランジの補修および金属ガスケットの交換を行った。あわせて、同様の構造である一次冷却系2系統（入口、出口）のフランジ面の清掃および金属ガスケット交換も行った。また、ファイバースコープを用いて、本体側配管内部を観察し、どの配管についても腐食等が無いことを確認した。

該当するフランジ面の堆積物を除去して清掃を行った後、腐食箇所に金属パテ（JAPAN DURMETAL COLDWELDING SYSTEM,LTD 製ペロメタル）を塗り、硬化後、オービタルサンダーなどを用いて研磨して、補修を行った。写真7に補修前のスペクトルシフタ①のアルミ製フランジの写真を示す。ガスケット当たり面の内側に堆積物が、また、当たり面近くに腐食が確認できる。補修後のフランジ面の様子を写真8に示す。

重水給排水系および一次冷却系の復旧後の様子を写真9および10に示す。重水給排水系については、復旧後、ヘリウムガスを用いた加圧試験を行い、復旧したフランジ部からヘリウムの漏洩が無いことを、リークディテクターを用いて確認した。一次冷却系については、復旧後、通水テストを行い、漏水がないことを確認した。

(5) 復旧の完了

5月21日、重水タンク本体ならびにスペクトルシフタ3系統および水シャッターへの注水を行なった。注水後、重水漏洩のないことを確認した。そして、6月1～4日、解体されていた照射室および遮蔽扉を復旧し、

本設備の補修復旧作業が完了した。



写真7 SP1系アルミフランジ補修前



写真8 SP1系アルミフランジ補修後

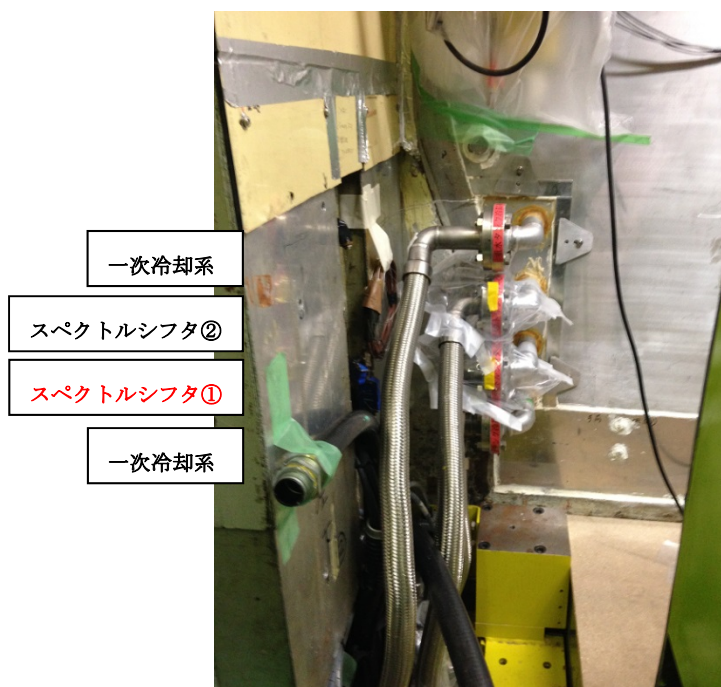


写真9 向かって左側の系統の復旧後の状況

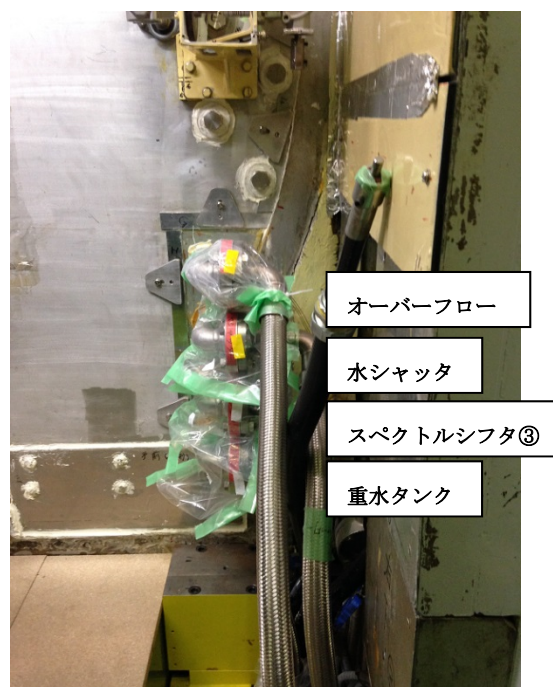


写真10 向かって右側の系統の復旧後の状況

2. 2 現在の状況

現在、重水漏洩の有無の確認は、(1)トリチウムモニタ(1F 重水タンク近傍、BF 重水ストレージタンク近傍、連続)、(2)研究炉巡視点検(BF 重水ストレージタンク近傍、他、一日朝夕の二回)、(3)除湿水の検査(BF 重水給排水系操作ステージ、BF 重水ストレージタンク近傍、一週間に一回)、(4)スタックガスのサンプリング検査(排気中ガス、三ヶ月に一回(炉室排気時))、(5)重水給排水系年次点検(1F 重水タンク近傍、1F 上下扉ピット内、BF 重水ストレージタンク近傍、一年に一回)、の5つの方法で行われている。また、重水水位およびカバーガス圧の変化にも注意を払っている。復旧以降現在に至るまで、異常は認められていない。

2. 3 放射線管理

(1) 屋内放射線管理

漏水発見直後における重水設備近傍の空気中のトリチウム濃度は $3.4 \times 10^{-1} \text{ Bq/cm}^3$ と評価された。この濃度は、空気中濃度限度（トリチウム水における告示別表 1 の第 4 欄）である $8 \times 10^{-1} \text{ Bq/cm}^3$ 以下であった。その後、炉室内の空気中トリチウム濃度は、除湿器によって炉室内凝結水をサンプリングし、その凝結水中トリチウム濃度を測定することによって監視し、空気中トリチウム濃度が減少傾向にあること（一部補修復旧作業時を除く）及び空気中濃度限度を下回っていることを確認した。なお、補修復旧作業時には、作業場所の空気中トリチウム濃度の連続監視を行い、作業環境における異常なトリチウム濃度の上昇がないことを確認した。

また、炉室エアロック手前に安全靴（スリッパ）及び手袋等の脱着場所を設置し、入室前に手袋等を装備し、退出時に手袋は破棄、履物は履き替えを指示することにより、炉室内トリチウムの汚染の拡大を防止した。

(2) 排気中放射性物質管理

重水設備近傍のトリチウムモニタの計測値から、重水漏洩は 1 月 15 日 9 時 30 分過ぎから始まったと推測された。1 月 15 日は炉室空調が運転されており、排気中トリチウム濃度は $4.0 \times 10^{-4} \text{ Bq/cm}^3$ と評価された。また、平成 26 年度第 4 四半期（平成 27 年 1 月～3 月）では、この重水漏洩に起因する排気口におけるトリチウム濃度は、平均値で $1.0 \times 10^{-4} \text{ Bq/cm}^3$ 、最高値（一日平均）で $8.8 \times 10^{-4} \text{ Bq/cm}^3$ であり、「排気中又は空気中濃度限度」（トリチウム水における告示別表 1 の第 5 欄）である $5 \times 10^{-3} \text{ Bq/cm}^3$ 以下であった。

平成 27 年度第 1 四半期（平成 27 年 4 月～6 月）では、排気口におけるトリチウム濃度は、平均値で $< 4.0 \times 10^{-5} \text{ Bq/cm}^3$ 、最高値（一日平均）で $1.7 \times 10^{-4} \text{ Bq/cm}^3$ であった。また、平成 27 年度第 2 四半期（平成 27 年 7 月～9 月）では、排気口におけるトリチウム濃度は、平均値、最高値（一日平均）ともに $< 4.0 \times 10^{-5} \text{ Bq/cm}^3$ であった。

これらの放出に起因する、周辺監視区域以遠における空気中トリチウム濃度の 3 ヶ月平均の最大値は、平成 26 年度第 4 四半期（平成 27 年 1 月～3 月）で $6.1 \times 10^{-9} \text{ Bq/cm}^3$ （スタックの西南西 170m 地点）、平成 27 年度第 1 四半期（平成 27 年 4 月～6 月）で $2.4 \times 10^{-9} \text{ Bq/cm}^3$ （スタックの南西 170m 地点）と評価された。これらの濃度はいずれも「排気中又は空気中濃度限度」（トリチウム水における告示別表 1 の第 5 欄）である $5 \times 10^{-3} \text{ Bq/cm}^3$ を下回っていた。

3. 今後の対策

3. 1 現在の対応状況

上述 2. 2 において挙げられている 5 つの方法を継続して実施する。さらに、トリチウムモニタの管理は研究炉部により行われているが、その情報を実験設備管理部・重水設備担当者も随時確認できるようにした。

さらに、重水設備のトラブルに関しては、原則、その保守管理者あるいは当番管理者が対応に当たることになっている。しかし、今回の重水漏洩の場合においては、より早急な対応が必要であるため、これを機に、発見者等が即座に対応できるマニュアルを作成した。

3. 2 今後の対策

(1)トリチウムモニタ感度向上策および重水漏洩の飛散・拡散防止対策

漏洩重水の飛散・拡散防止のため、各フランジにカバーを設置し、トリチウム濃度計測のためのトリチウムのモニタのサンプリング管を増設する。各重水系統の上部フランジについては、図2に示すように炉心に向かって左側の4系統(一次冷却系出口、SP2、SP1、一次冷却系入口)、右側の4系統(オーバーフロー、水シャッター、SP3、重水タンク)をまとめて、それぞれ一つの受けを設置し、トリチウムモニタのサンプリング管に接続し、トリチウム濃度計測の感度を向上させる。

(2) フランジの定期点検およびガスケットの交換について

フランジの解体点検および金属ガスケットの交換時期は、2年後に行い、フランジ及び金属ガスケットの状況を確認した上で、その後の解体点検の期間について検討する。

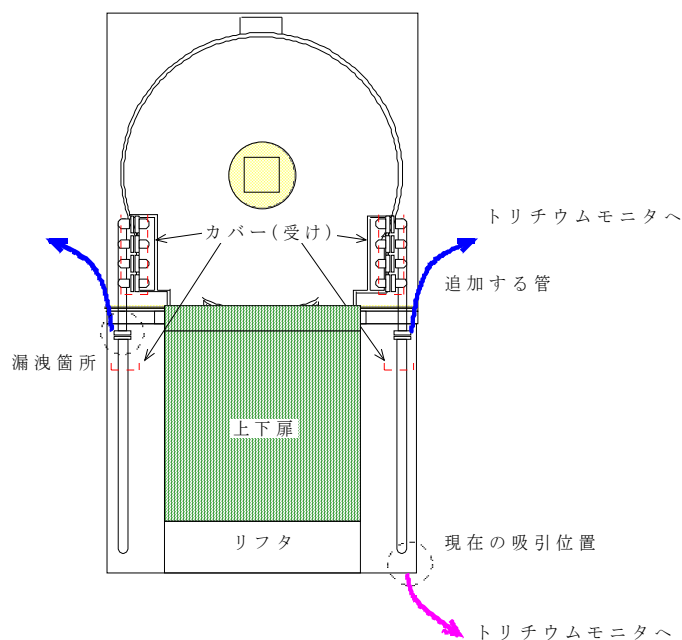


図2 カバー(受け)およびサンプリング管の増設位置

KUR重水設備からの重水漏えい対策と現状について

京都大学原子炉実験所
実験設備管理部
吉永尚生

重水設備について

- γ 線の少ない熱中性子照射場を提供する設備

1995年に大改修

- 設備の安全性向上
- 熱中性子から熱外中性子までの利用を可能とする性能向上
- 5MW 連続運転 中の医療照射を可能とする等の使い勝手の向上

BNCT症例数世界一を誇る

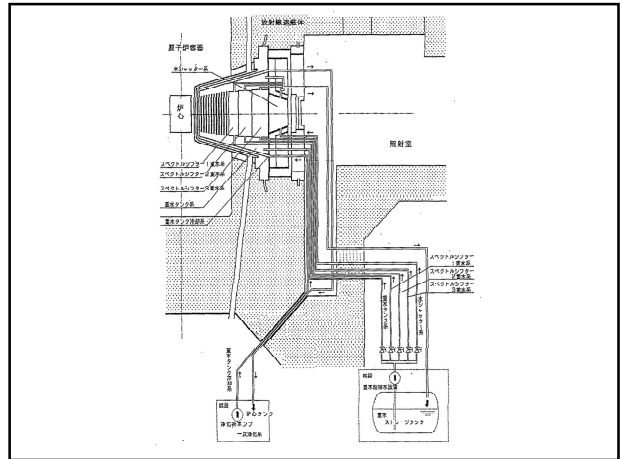
重水漏えい発覚

サブパイルームにて巡視点検中に発見

重水漏えい発見箇所

重水給排水設備 (イオン交換室)

DAY 0 : 1月18日



漏えい箇所の特定 の前に。。。

作業者の余分な被ばくを防ぐために

予測した漏えい箇所
フレキホース
フランジ接合部

重水給排水設備 (イオン交換室)

DAY 4 : 1月22日

作業現場へのトリチウムモニター設置

CCDカメラによる調査



ピット内に重水が溜まっていないか。
配管やフランジ部に重水が付着していないか。

DAY 5 : 1月23日

目視できる範囲が狭く調査が困難



遮蔽扉(昇降シャッター)を解体して調査することに決定

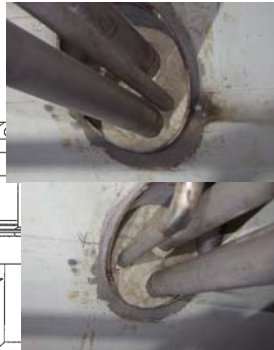
リークテスト



イチバン怪しい場所からリークが確認できない！！

DAY 8 : 1月26日

他に怪しい場所は？



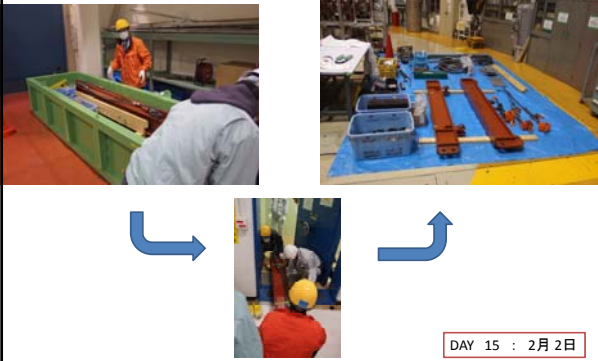
① 大型試料輸送台車
② 放射線遮蔽体
③ 放射線モニター
④ モニターカメラ
⑤ 空調システム

重水給排水設備 (イオン交換室)

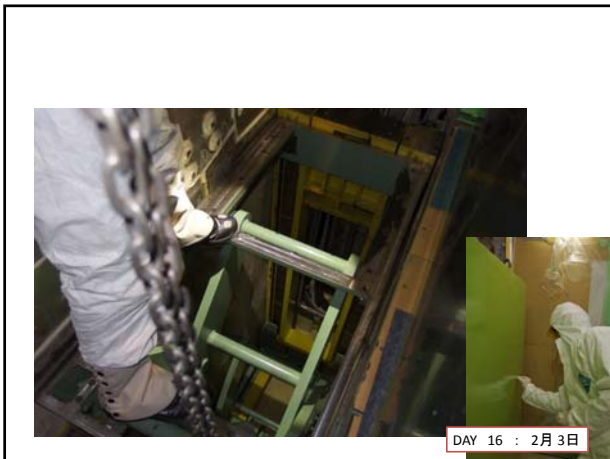
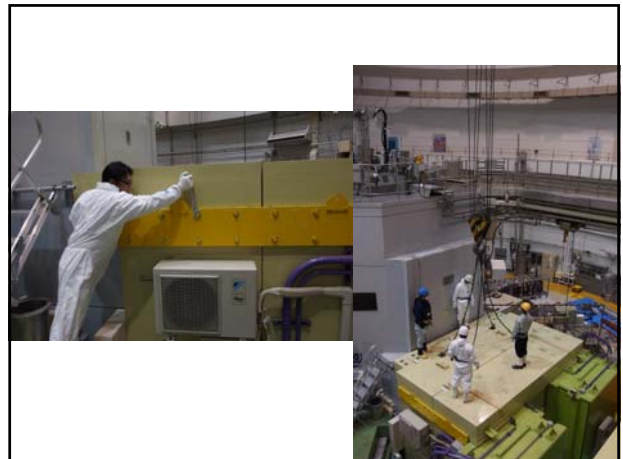
- 限られた条件での原因探しに限界
- やはり装置を解体して直接確認したい

遮蔽扉(油圧式昇降シャッター)を解体することに

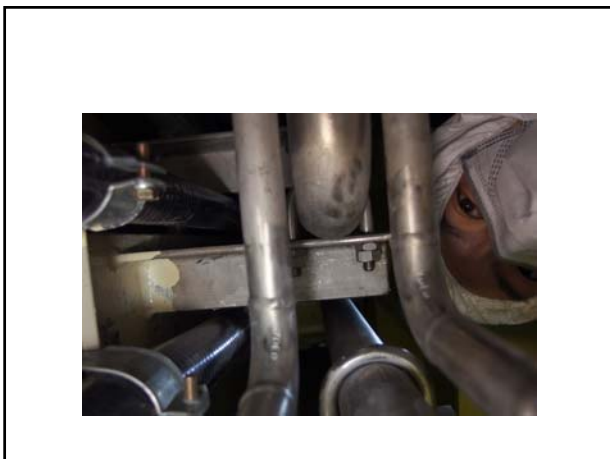
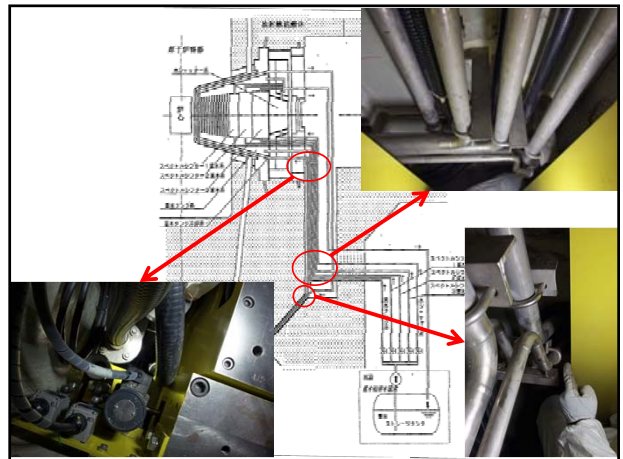
重水設備解体



DAY 15 : 2月2日



DAY 16 : 2月3日



Heリークテスト

～漏えい箇所探索～



- 各部の養生
- フランジ結合部
 - フレキホース
 - 配管溶接部
 - バルブ接続部

やっぱり検出できない。。。？

出た



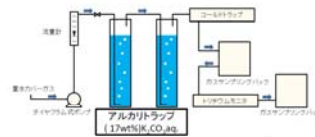
確実に漏えいしている箇所を1つは特定！

➡ 他に漏えいしているところはないか

DAY 18 : 2月6日

解体の前に

脱圧作業②



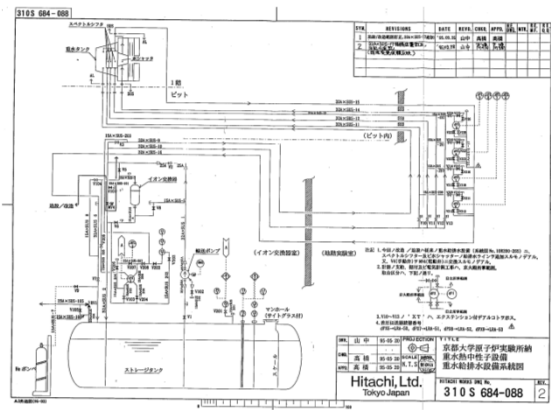
- ・バブリング水をアルカリ水溶液に変更
- ・バブリング管を大きくし、液量を 0.7L→3Lに変更



重水タンク中の放射能(15.3.23 奥村 良氏)より抜粋

カバーガス圧を大気圧にまで減圧したのち分解作業

解体の前に



スペクトルシフター1フランジ解体



DAY 33 : 2月20日

フランジ結合部下側(配管側)



フランジ結合部上側(フレキホース)



金属ガスケットに腐食あり！

金属ガスケット (U-TIGHTSEAL)



その他の漏えい箇所は？ ～再度リークテスト～

熱交換器室

照射室

地階実験室

重水給排水設備 (イオン交換釜)

DAY 37 : 2月24日

Heリークテストの結果

- 他のフランジ結合部、溶接部、バルブ結合部からは漏えいなし。
- 漏えい箇所はスペクトルシフター1のフレキホース締結フランジ1か所のみ。

DAY 37 : 2月24日

配管の健全性検査

その他のフランジ結合部の解体、検査

アルミフランジのいくつかに腐食痕あり。
ステンレスフランジには腐食なし。

DAY 61 : 3月20日

配管の健全性検査

フレキシブルホース検査

溶接部の有害な腐食や、配管内の大きな汚れは認められない

DAY 88 : 4月16日

アルミフランジの補修

補修方法について

- アルミフランジの溶接による付替え
 - 手っ取り早い。
 - × 作業スペースもなければバーナーでの加温も不可
 - × 重水タンク本体を搬出 金銭的に不可
- フランジフェーサーによる補修
 - きれいな面仕上げ
 - × 機械が大きくて作業スペースを確保できない
- 金属補修材による補修
 - 安価である
 - △ 面の仕上げについて不透明

DAY 61 : 3月20日

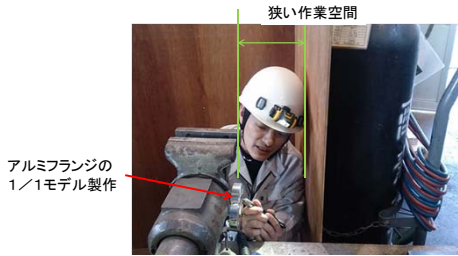
アルミフランジの補修

補修工程について

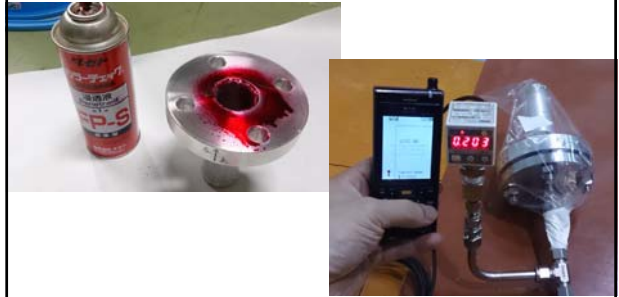
- フランジ腐食部の清掃および研削
- 補修材の塗布
- フランジ面の面出し(研磨)

DAY 88 : 4月16日

作業性の確認、補修訓練など



アルミフランジ実物大モデル



どのフランジを補修するのか

～詳細なアルミフランジの腐食具合の調査～

重水給排水管6系統のうち

スペクトルシフター1 スペクトルシフター2 スペクトルシフター3



リユーター削り

スペクトルシフター1 スペクトルシフター2 スペクトルシフター3



パテ盛り

スペクトルシフター1 スペクトルシフター2 スペクトルシフター3



やすり研削

スペクトルシフター1 スペクトルシフター2 スペクトルシフター3

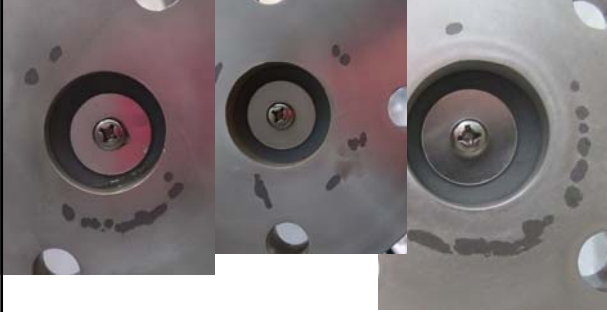


オービタルグラインダー研磨

スペクトルシフター1

スペクトルシフター2

スペクトルシフター3



重水給排水管の復旧

- 各フランジを新しい金属ガスケットで締結
- Heガスリークテスト
- 通水、漏えいテスト

- 1次冷却水吸排水管のガスケット交換
- 同配管の健全性チェック

- 遮蔽扉、遮蔽体の復旧

環境試料中の放射能測定について

京都大学原子炉実験所・技術室 三宅 智大

1、はじめに

京都大学原子炉実験所では、定期的に、原子炉施設から放出される排気及び排水並びに敷地境界付近における放射能濃度を測定・評価し、原子力規制委員会に報告している。

また実験所と熊取町、泉佐野市及び貝塚市との間にそれぞれ締結された「原子炉施設及び住民の安全確保に関する協定書」の取り決めに従い、上記の報告事項に加え、施設境界付近及び実験所外における実効線量並びに周辺環境試料中放射能濃度の測定結果を報告している。

2、報告内容

- ・環境試料中の放射能：池・河川の底質（土・堆積物）、陸上表層土、陸水（表層水）、飲料用の原水、海水及び空気中浮遊じん、降下物、農産食品又は指標生物中の各環境試料の放射能
- ・原子炉施設からの放出放射能：研究炉排気中のアルゴン4 1量、原子炉施設排水中の放射能
- ・外部放射線に係る実効線量：実験所の敷地境界付近及び所外観測所における空間放射能測定結果から、平常時の自然放射線実効線量（平常値）と原子炉運転時の実効線量を比較

3、試料採取、測定前処理

- 河川・池の底質及び陸上土壌：採取面積約 1000cm²、採取深度約 5cm、採取量約 3～6kg 採取
測定前処理：混入物（石、ゴミ、植物根等）を除去し、乾燥細粉化（2mm 以下）後、250～400g を測定容器（250cm³）に密封する。
- 陸水及び海水：表層水約 50採取
測定前処理：淡水は一度濾過し、1L を蒸発乾固し、試料皿に入れる。海水は、鉄バリウム法で沈殿を作り試料皿に入れる。
- 生物（農産食品又は指標生物）：動植物とも可食部を主な試料とし、生育時期に合わせて 5～20kg 採取
測定前処理：試料を選別し、水で洗浄、乾燥細粉化後、灰化し測定容器に密封する。
- 大気中浮遊じん：18～70m³の空気を吸引し、ろ紙上に浮遊じんを集める。
試料前処理：ろ紙を直径 5cm に打ち抜き使用する。
- 降下物：降水を集める
測定前処理：蒸発濃縮し、測定容器に密封する。

4、試料測定

- 河川・池の底質及び陸上土壌：低バックグラウンド Ge 半導体検出器を用いてガンマ核種分析
- 生物（農産食品又は指標生物）：低バックグラウンド Ge 半導体検出器を用いてガンマ核種分析
- 水（河川・池・海）： α β 2 系統多サンプル自動測定装置を用いて全ベータ放射能を測定
- 大気中浮遊じん： α β 2 系統多サンプル自動測定装置を用いて全ベータ放射能を測定
- 降下物：低バックグラウンド Ge 半導体検出器を用いてガンマ核種分析

環境試料中の放射能測定について

三宅 智大

・はじめに

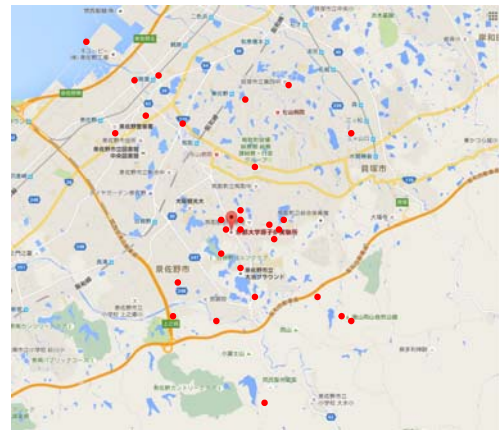
- 京都大学原子炉実験所では、定期的に、原子炉施設から放出される排気及び排水並びに敷地境界付近における放射能濃度を測定・評価し、原子力規制委員会に報告している。
- 実験所と熊取町、泉佐野市及び貝塚市との間にそれぞれ締結された「原子炉施設及び住民の安全確保に関する協定書」の取り決めに従い、上記の報告事項に加え、施設境界付近及び実験所外における実効線量並びに周辺環境試料中放射能濃度の測定結果を報告している。

京都大学原子炉実験所における環境放射能測定報告書

報告内容

- 環境試料中の放射能: 池・河川の底質(土・堆積物)、陸上表層土、陸水(表層水)、飲料用の原水、海水及び空気中の浮遊じん、降下物、農産食品又は指標生物中の各環境試料の放射能
- 原子炉施設からの放出放射能: 研究炉排気中のアルゴン41量、原子炉施設排水中の放射能
- 外部放射線に係る実効線量: 実験所の敷地環境附近及び所外観測所における空間放射能測定結果から、平常時の自然放射線実効線量(平常値)と原子炉運転時の実効線量を比較

環境試料採取地点



測定物	測定対象	測定機器
河川・池の底質及び陸上土壌	ガンマ核種	低バックグラウンドGe半導体検出器
生物(農産食品又は指標生物)	ガンマ核種	低バックグラウンドGe半導体検出器
降下物(降水)	ガンマ核種	低バックグラウンドGe半導体検出器
陸水及び海水	全ベータ	αβ2系統多サンプル自動測定装置
大気中浮遊じん	全ベータ	αβ2系統多サンプル自動測定装置



河川・池の底質及び陸上土壌

試料採取: 採取面積約1000cm²、採取深度約5cm、採取量約3~6kg採取。



採取道具

サンプリング風景(底質・土壌)

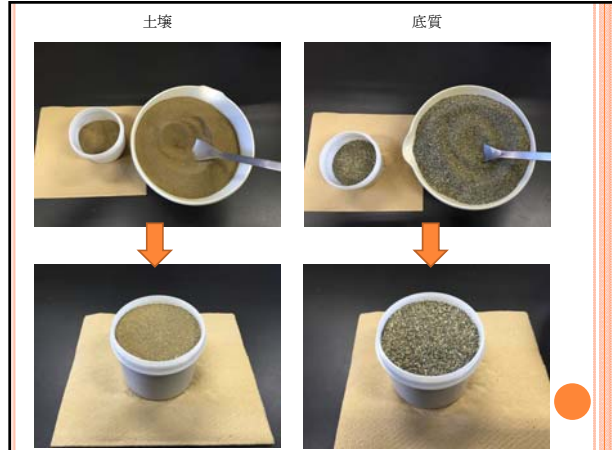
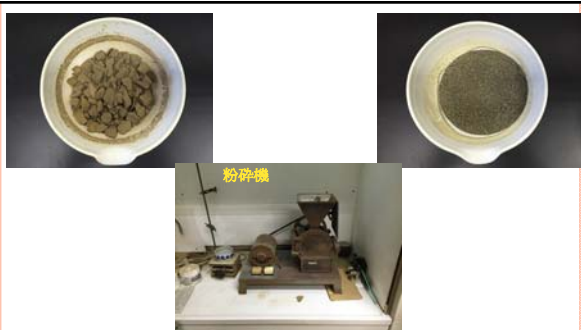
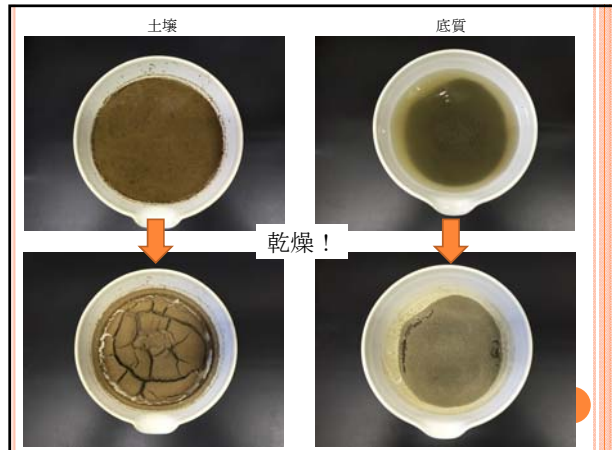


底質・土壌試料の前処理

混入物(石、ゴミ、植物根等)を除去し、乾燥細粉化(2mm以下)後、250~400gを測定容器(250cm³)に密封する。



使用器具





降水物
降水(雨水)を集める。

実験所内の気象観測棟付近に設置

受水器

降水物の前処理

蒸発濃縮し、測定容器に密封する。

乾燥

半期分の雨を濃縮

低バックグラウンドGe半導体検出器で測定

陸水及び海水

試料採取: 表層水約5L採取

採取道具

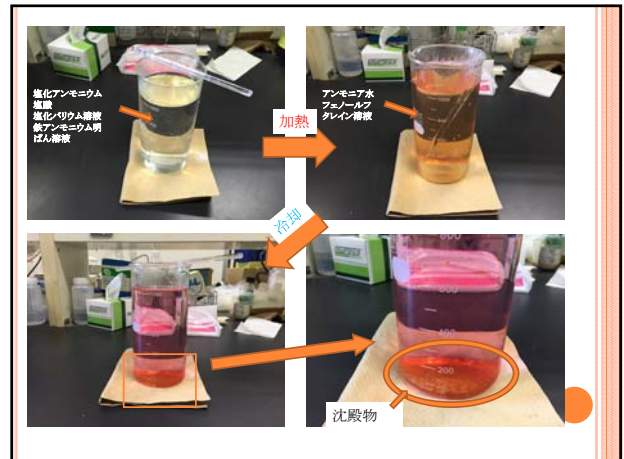
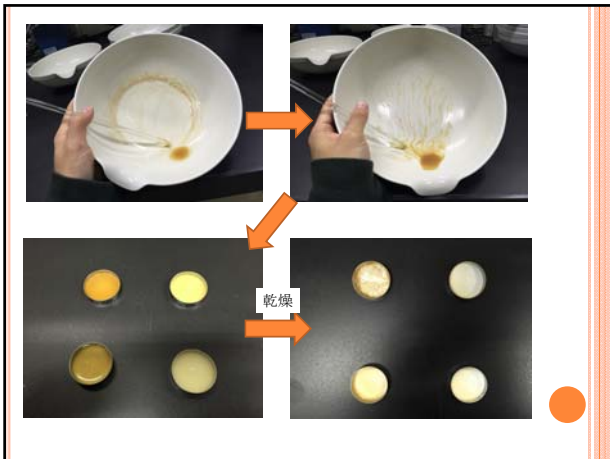
サンプリング風景(陸水)

陸水及び海水の前処理

陸水 : 一度濾過し、1Lを蒸発乾固し、試料皿に入れる。
海水 : 一度濾過し、1Lを鉄バリウム法で沈殿を作り試料皿に入れる。

使用器具

乾燥させると...



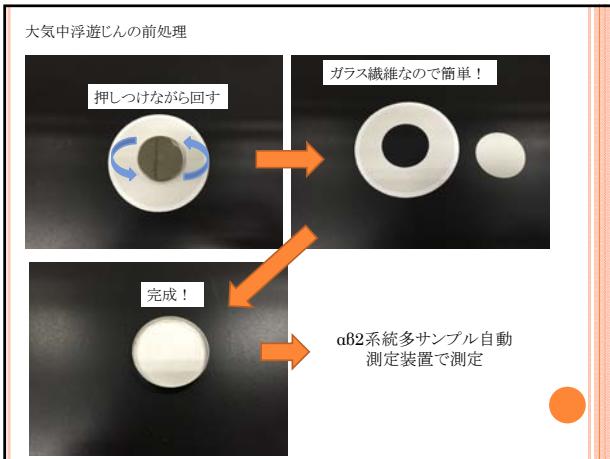
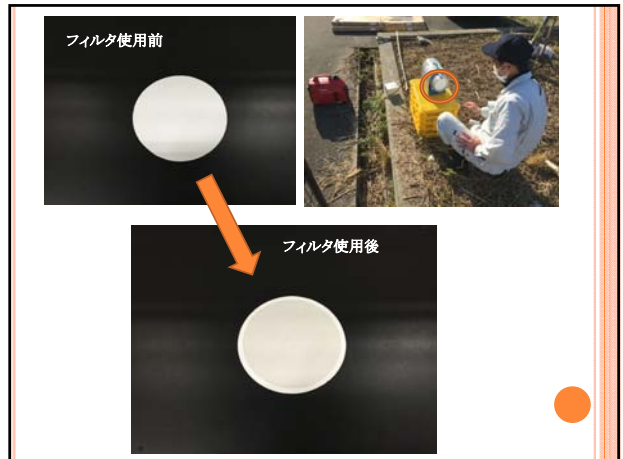


表4 環境試料中の放射能

測定日: 2011年11月10日

試料名	試料番号	測定日時	測定装置	測定条件	測定結果	検出限界	備考
A	環境試料	2011.11.10	Ge	100	1.2	0.1	
	環境試料	2011.11.10	Ge	100	1.2	0.1	
	環境試料	2011.11.10	Ge	100	1.2	0.1	
	環境試料	2011.11.10	Ge	100	1.2	0.1	
	環境試料	2011.11.10	Ge	100	1.2	0.1	
	環境試料	2011.11.10	Ge	100	1.2	0.1	
	環境試料	2011.11.10	Ge	100	1.2	0.1	
	環境試料	2011.11.10	Ge	100	1.2	0.1	
	環境試料	2011.11.10	Ge	100	1.2	0.1	
	環境試料	2011.11.10	Ge	100	1.2	0.1	
	環境試料	2011.11.10	Ge	100	1.2	0.1	
	環境試料	2011.11.10	Ge	100	1.2	0.1	
B	環境試料	2011.11.10	Ge	100	1.2	0.1	
	環境試料	2011.11.10	Ge	100	1.2	0.1	
	環境試料	2011.11.10	Ge	100	1.2	0.1	
	環境試料	2011.11.10	Ge	100	1.2	0.1	
	環境試料	2011.11.10	Ge	100	1.2	0.1	
	環境試料	2011.11.10	Ge	100	1.2	0.1	
	環境試料	2011.11.10	Ge	100	1.2	0.1	
	環境試料	2011.11.10	Ge	100	1.2	0.1	
	環境試料	2011.11.10	Ge	100	1.2	0.1	
	環境試料	2011.11.10	Ge	100	1.2	0.1	
	環境試料	2011.11.10	Ge	100	1.2	0.1	

表 2-2 陸水運具別・種別別・運送距離別及び運送品別輸送実績

運送品種別	運送品名	単位	前年度実績		増減率
			数量	数量	
陸水 運具別	全輸送品	トン	102,712,000	94,772,000	9.2%
	陸輸送	トン	82,712,000	77,772,000	6.4%
	水輸送	トン	20,000,000	17,000,000	17.6%
	陸輸送・水輸送	トン	20,000,000	17,000,000	17.6%
	陸輸送・水輸送	トン	20,000,000	17,000,000	17.6%
	陸輸送・水輸送	トン	20,000,000	17,000,000	17.6%
	陸輸送・水輸送	トン	20,000,000	17,000,000	17.6%
	陸輸送・水輸送	トン	20,000,000	17,000,000	17.6%
	陸輸送・水輸送	トン	20,000,000	17,000,000	17.6%
	陸輸送・水輸送	トン	20,000,000	17,000,000	17.6%

※ 1. 前年度実績は、前年度実績（前年度実績）を基に算出されたものである。増減率は、前年度実績を100として算出されたものである。増減率は、前年度実績を100として算出されたものである。

表 2-3 運送品種別・運送品名別・運送距離別輸送実績

運送品種別	運送品名	単位	前年度実績		増減率
			数量	数量	
陸輸送	陸輸送	トン	82,712,000	77,772,000	6.4%
	水輸送	トン	20,000,000	17,000,000	17.6%

※ 1. 前年度実績は、前年度実績（前年度実績）を基に算出されたものである。増減率は、前年度実績を100として算出されたものである。増減率は、前年度実績を100として算出されたものである。

表 2-4 運送品種別・運送品名別・運送距離別輸送実績

運送品種別	運送品名	単位	前年度実績		増減率
			数量	数量	
陸輸送	陸輸送	トン	82,712,000	77,772,000	6.4%
	水輸送	トン	20,000,000	17,000,000	17.6%

※ 1. 前年度実績は、前年度実績（前年度実績）を基に算出されたものである。増減率は、前年度実績を100として算出されたものである。増減率は、前年度実績を100として算出されたものである。

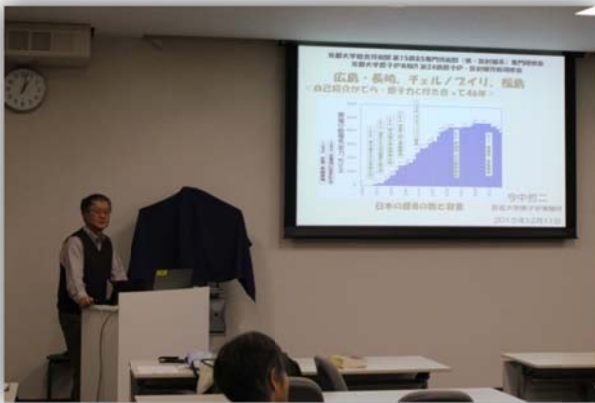
研修会の写真集



川端所長 挨拶



特別講演 木野村先生



特別講演 今中先生



技術発表 井本氏



技術発表 吉永氏



技術発表 三宅氏

平成 27 年度原子炉実験所技術室業務報告会

平成 27 年度技術室業務報告会プログラム

開催場所：研究棟 1 階会議室

平成 27 年 11 月 26 日 (木)

13:10-15:00 司会者：小林徳香			
13:10-13:15		挨拶	南 馨
13:15-13:30	01	将来計画及び新規制基準適合性審査の状況について	藤原 靖幸
13:30-13:45	02	管理センターに移って	大野 和臣
13:45-14:00	03	平成 27 年度技術室業務報告	張 俊
14:00-14:15	04	共同利用支援システムを用いた次年度採択課題評価	平井 康博
14:15-14:30	05	管理区域外物品持出管理記録	山田 辰矢
14:30-14:45	06	冷却設備等の点検整備	荻野 晋也
14:45-15:00	07	新規制基準対応について	長谷川 圭
15:00-15:15 休憩			
15:15-16:45 司会者：長谷川圭			
15:15-15:30	08	KUCA での新規制基準適合性審査への対応	竹下 智義
15:30-15:45	09	オフサイトセンター巡視	小林 徳香
15:45-16:00	10	平成 27 年度業務報告会	猪野 雄太
16:00-16:15	11	逆洗浄によるイオン交換処理出口流量計の流量改善	井本 明花
16:15-16:30	12	平成 27 年度業務報告会	田中 良明
16:30-16:45	13	京大炉 BNCT における診療放射線技師業務	栗原 孝太

平成 27 年 11 月 27 日 (金)

13:15-14:45 司会者：金山雅哉			
13:15-13:30	14	平成 27 年度業務報告	藤原 慶子
13:30-13:45	15	α 線用サーベイメータの遮光膜の交換について	三宅 智大
13:45-14:00	16	原子炉実験所における加速器放射化物	牧 大介
14:00-14:15	17	KUR 制御室の記録計更新作業について	中森 輝
14:15-14:30	18	耐震防火 40 トン水タンク水位計の取り付け	丸山 直矢
14:30-14:45	19	FFAG 主リング入射用 LINAC における冷媒漏れについて	阪本 雅昭
14:45-15:00 休憩			
15:00-16:15 司会者：山田辰矢			
15:00-15:15	20	業務報告会 2015	奥村 良
15:15-15:30	21	先端エレクトロニクス DAQ セミナー2015	阿部 尚也
15:30-15:45	22	気液二相流実験装置	金山 雅哉
15:45-16:00	23	圧気輸送管照射設備の点検と部品交換	飯沼 勇人
16:00-16:15	24	マシニングセンターによる 2 次元曲面中性子ミラーの製作	吉永 尚生

引き続き

- ・ 技術室会議 (約 30 分)
- ・ 所長懇談会 (約 30 分)
- ・ 懇親会

(終了予定 19:30)

編集後記

この研修会は、第5専門技術群（核・放射線系）専門研修会と原子炉・放射線技術研修会を兼ねて毎年開催されています。今回で第15回目となり、原子炉・放射線技術研修会としては24回目の開催となります。

講演については、原子炉実験所の教員の方に特別講演をお引き受けいただき、2件の講演が実現しました。難しい内容ですが、技術職員にも分かるように、また技術面でも役に立つような説明をしていただけをお願いしました。1件目は原子力基礎工学研究部門の木野村淳教授の陽電子の発生・制御から計測法などについて、2件目は今中哲二助教による原爆の開発から広島・長崎への投下、原発の開発、チェルノブイリ及び福島原発事故について詳しい説明がありました。技術的な側面でもとてもためになる講演でした。

技術発表として、原子炉実験所技術室の技術職員3名の各々職務に関連する内容の発表がありました。原子炉実験所技術室には、研究炉部、臨界装置部、実験設備管理部、放射線管理部、放射性廃棄物処理部がありますが、今回は放射性廃棄物処理部、実験設備管理部、放射線管理部の技術職員になりました。

京都大学として人員削減が計画され、現在は定年等による退職者があっても人員の補充はありません。したがって、技術職員は減少しつつあり人員不足になっています。どの部署も厳しい中、業務の効率化を図り、どうしても必要などころには部署を超えた応援体制をとっています。

原子炉実験所には研究用原子炉（KUR）と臨界実験装置（KUCA）の2基の原子炉がありますが、東京電力福島第1原発事故の後、原子力規制庁による新規制基準の適合審査のため停止しています（8月現在）。現在、運転再開に向け努力しています。

最後に特別講演を行ってくださった先生方、技術発表を行った技術職員、受付、司会、準備、片付け等にご協力いただいたすべての方々に厚くお礼を申し上げます。

平成27年度 原子炉実験所技術室・第5専門技術群 研修会世話人

南 馨、土山辰夫、吉野泰史、*山本弘志（原子炉実験所技術室）

（*世話人代表）

KUR REPORT OF
KYOTO UNIVERSITY RESEARCH
REACTOR INSTITUTE

発行所 京都大学原子炉実験所
発行日 平成 28 年〇月
住所 大阪府泉南郡熊取町朝代西 2 丁目
TEL (072) 451-2300
印刷所 株式会社 〇〇 印刷
住所 大阪府