

放射線と人体影響 及び 放射能汚染の除染技術

平成24年9月8日

東京工業大学原子炉工学研究所
有富正憲

目次

1. 放射線と放射能
2. 自然界の放射能
3. 放射線の人体影響
4. 除染技術

1. 放射線と放射能

1.1 放射線と放射能

➤ 放射線

— 粒子線

- ・ α 線, β 線, 中性子線

— 電磁波

- ・X線, γ 線

➤ α 線

- 陽子2個と中性子2個がヘリウムの原子核

- 電氣的にプラス

- 空気中で減衰し, 紙1枚程度で遮蔽可能

➤ β 線

- 高速エネルギーを有する電子線

- 薄い金属板で遮蔽可能

➤ γ 線

- 高速エネルギーを有する電磁波
- 電磁波はエネルギーの低い順に紫外線, X線, γ 線
- 重たい物質により遮蔽

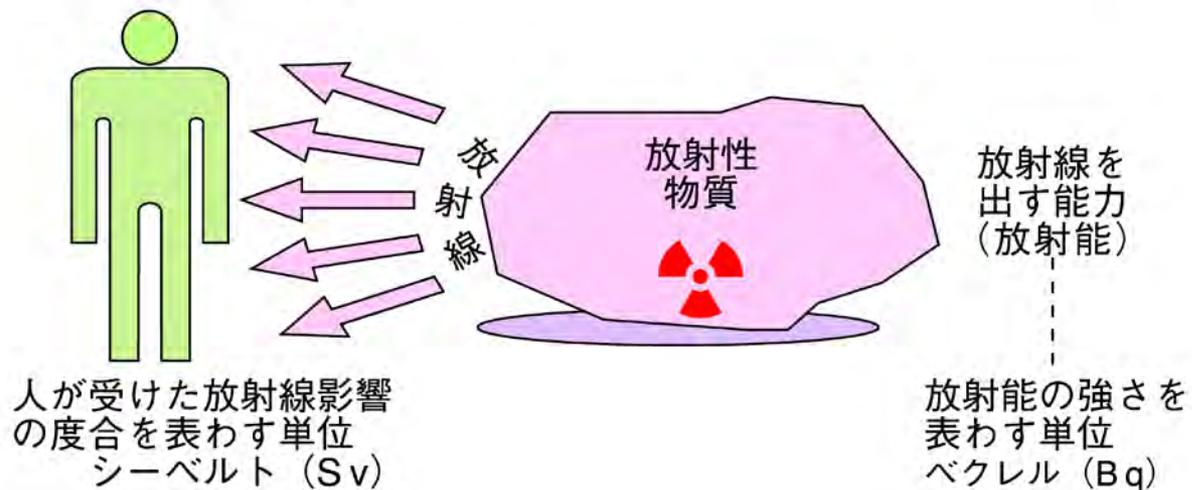
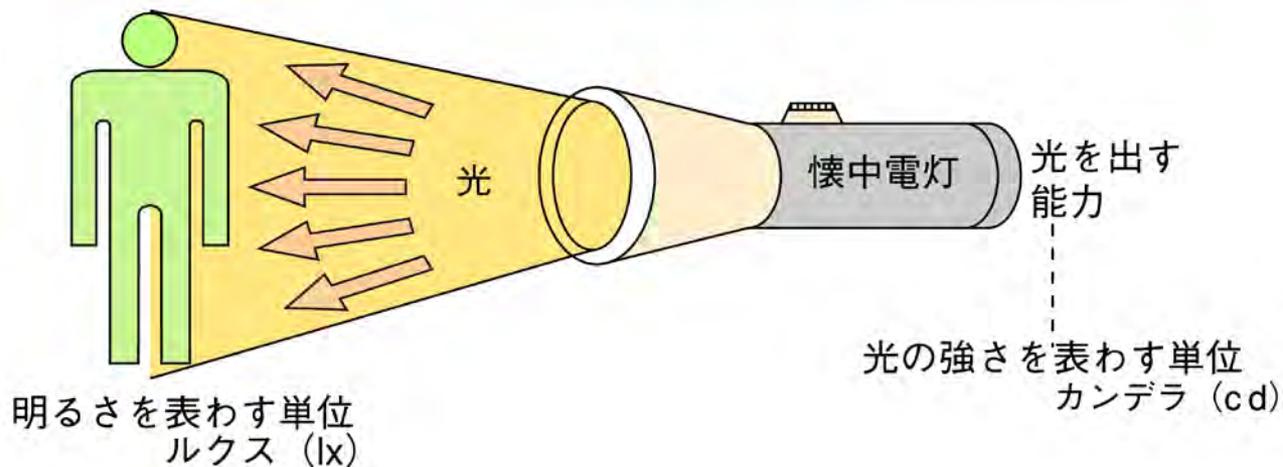
➤ 中性子

- 自発核分裂や核分裂反応により中性子を放出
- 減速材(例えば, 水)で中性子エネルギーを減速
- 中性子吸収材(例えば, ほう素)などで吸収

➤ 放射能

- 放射線を出す力
 - 放射能を持っている物質 = 放射性物質

放射能と放射線



➤ 放射能の強さの単位

— 放射能の強さを表す単位 = ベクレル(Bq)

・ 1秒当たり放射性同位元素の壊変数

= 放射線の放出数

(エネルギーは考慮されていない)

— 吸収線量 : 単位質量あたりに与えられる
エネルギー

= グレイ(Gy) (J/kg)

— 人が受けた放射線の量を表す単位(等価線量)

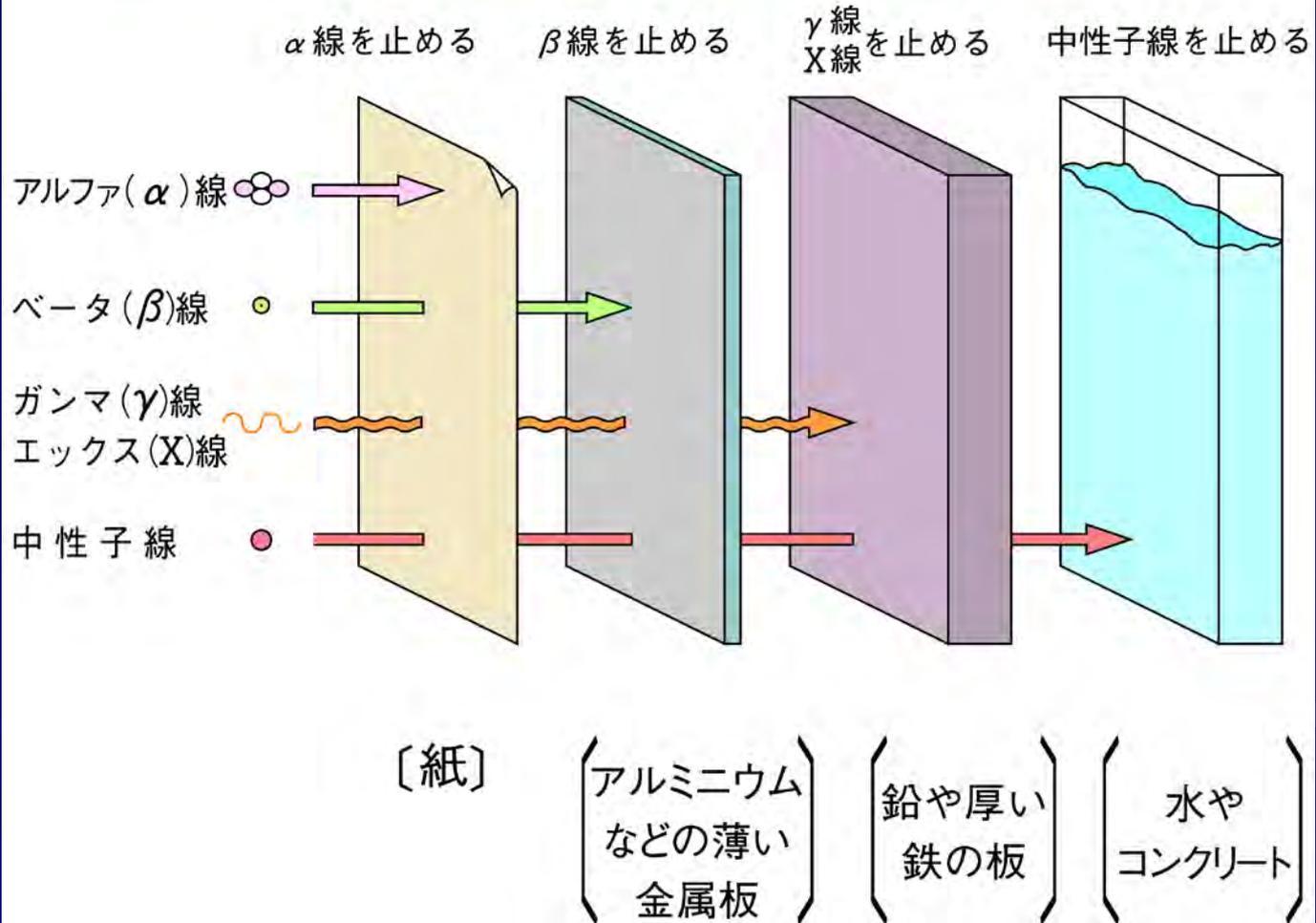
= シーベルト(Sv)

— 等価線量 = 毎時の吸収線量 × 放射線荷重係数

— 放射線荷重係数

・ X線, γ線とβ線 = 1, ・ 中性子, 陽子 = 10, ・ α線 = 20

放射線の種類と透過力



1. 2 放射能の減衰

➤ 放射能の減衰

- 放射性物質は放射線を放出し、他の原子や同位元素に変換される
- 放射能の経時変化

$$N(t) = N(0) \exp(-\lambda t)$$

λ : 崩壊常数

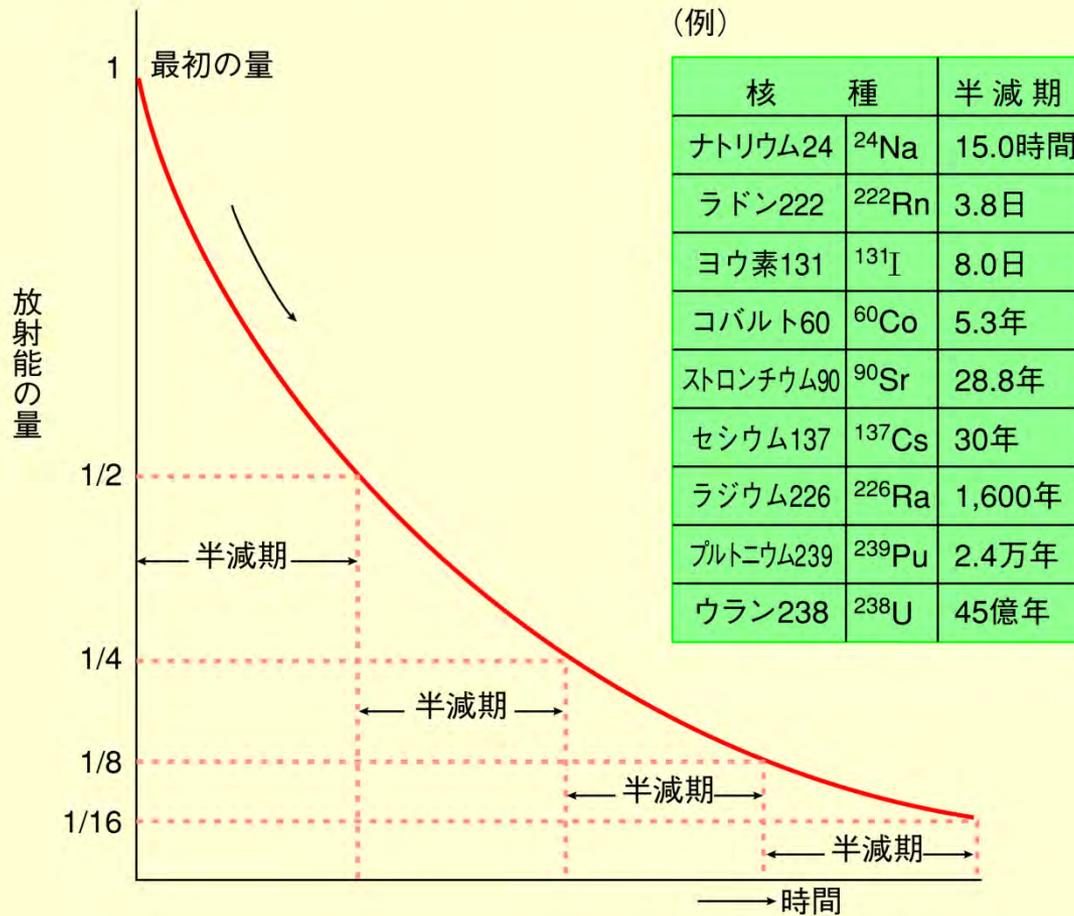
➤ 半減期

- 放射能が半分になる時間は同位元素によって一定 = 半減期 ($T_{1/2}$)

$$N(0)/2 = N(0) \exp(-\lambda T_{1/2})$$

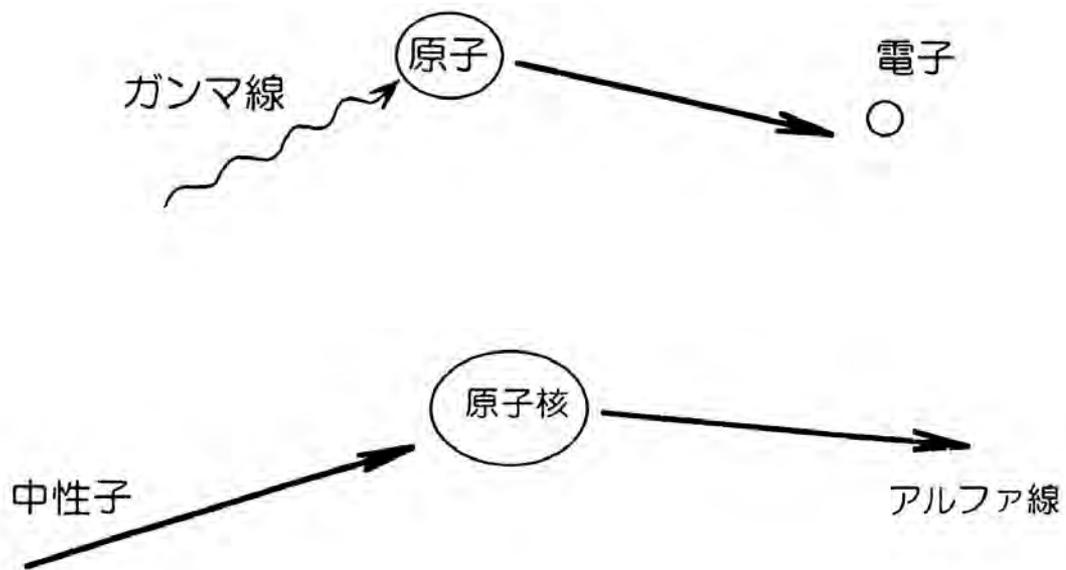
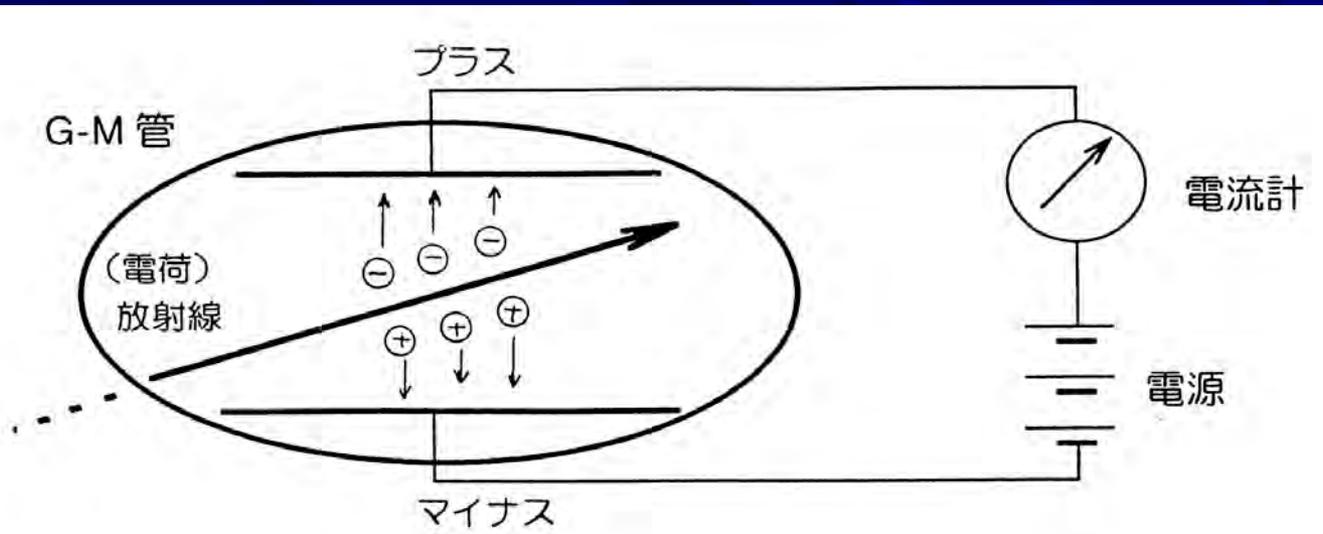
$$T_{1/2} = \ln 2 / \lambda = 0.693 / \lambda$$

放射能の減り方



1.3 放射線計測

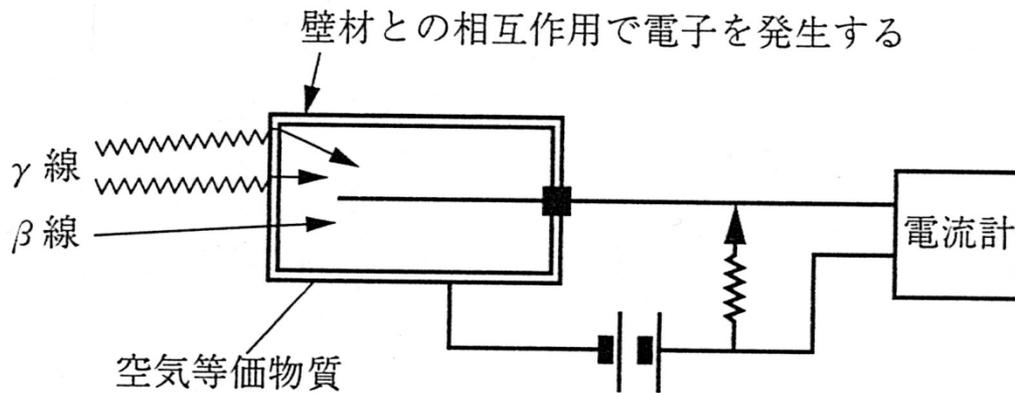
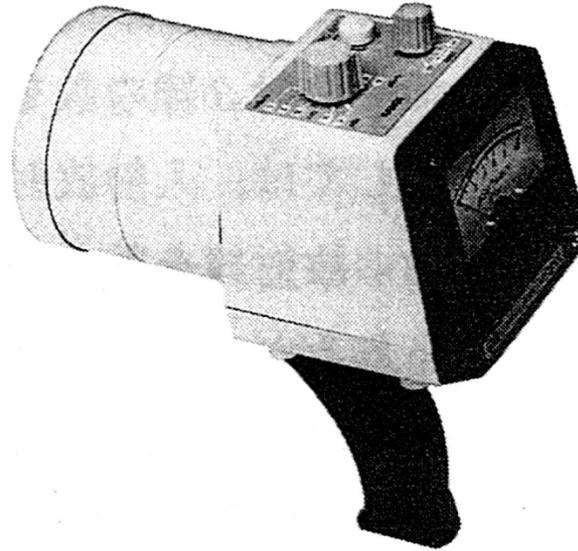
- 荷電粒子(α 線と β 線)の計測
 - 電荷を持った粒子が物質中を通過
 - 物質中の原子と衝突して電子を叩き出す
 - 原子がイオン(プラスの電荷)となる
 - イオンと電子を集めて電気信号に変換して計測
- γ 線の計測
 - γ 線を物質にぶつけて γ 線のエネルギーを電子に移す
 - この電子を計測する
- 中性子の計測
 - 中性子を原子核にぶつけて原子核反応を引き起こす
 - 発生する α 線などを計測



主な放射線検出器

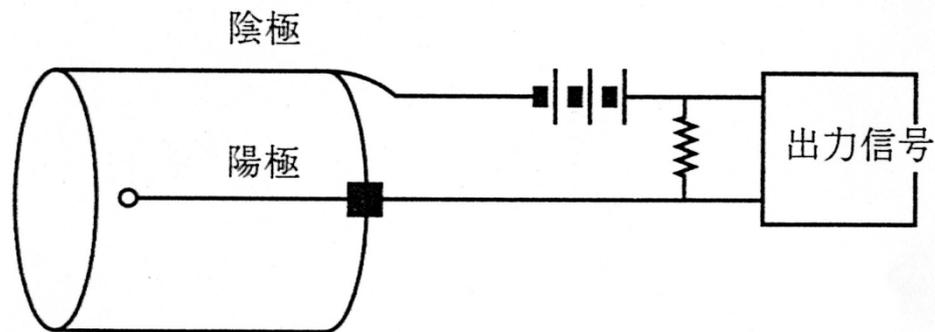
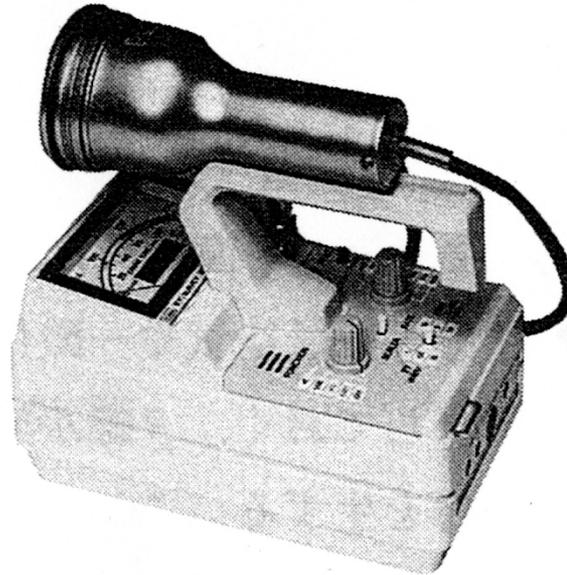
利用する現象	計測器	対象放射線
電離作用	電離箱 GM計数管 半導体検出器 中性子検出器 (BF ₃ 比例計数管) 電子ポケット線量計	γ線, β線 γ線, β線 γ線, β線 中性子 γ線
蛍光作用	シンチレーション検出器	α線, γ線, β線 中性子
写真作用	フィルムバッチ	γ線, β線 中性子

電離箱



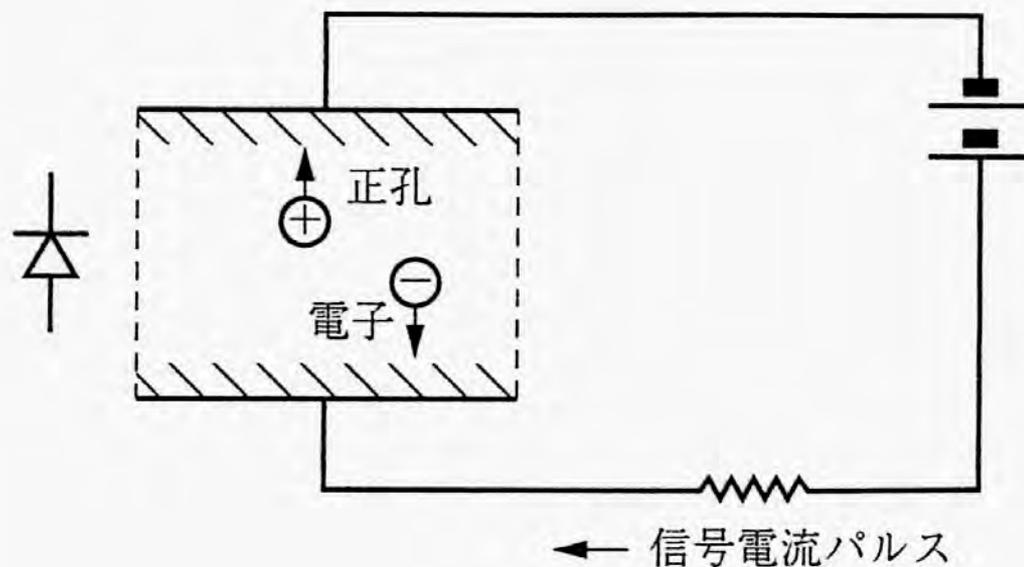
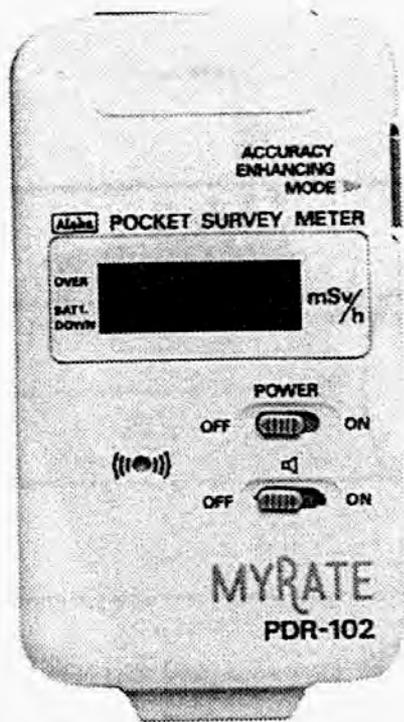
主として用いられる直流電離箱(電流式電離箱)は、瞬時に大きな放射線がきても電流として集めるので数え落としがない

GM計数管

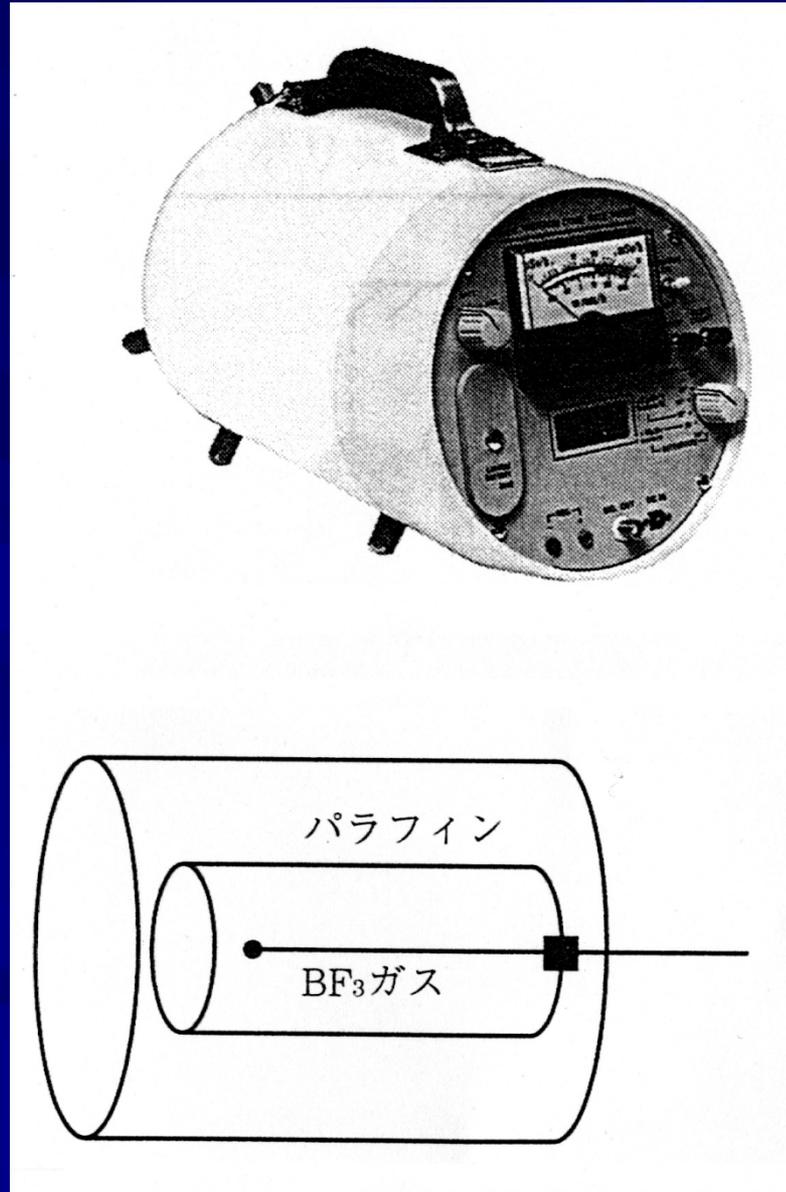


アルゴン，ネオンなどを封入し，一度始まった放電を消去するためアルコールまたは，ハロゲンガスも加えてある

半導体検出器 (ポケットサーベイメータ)



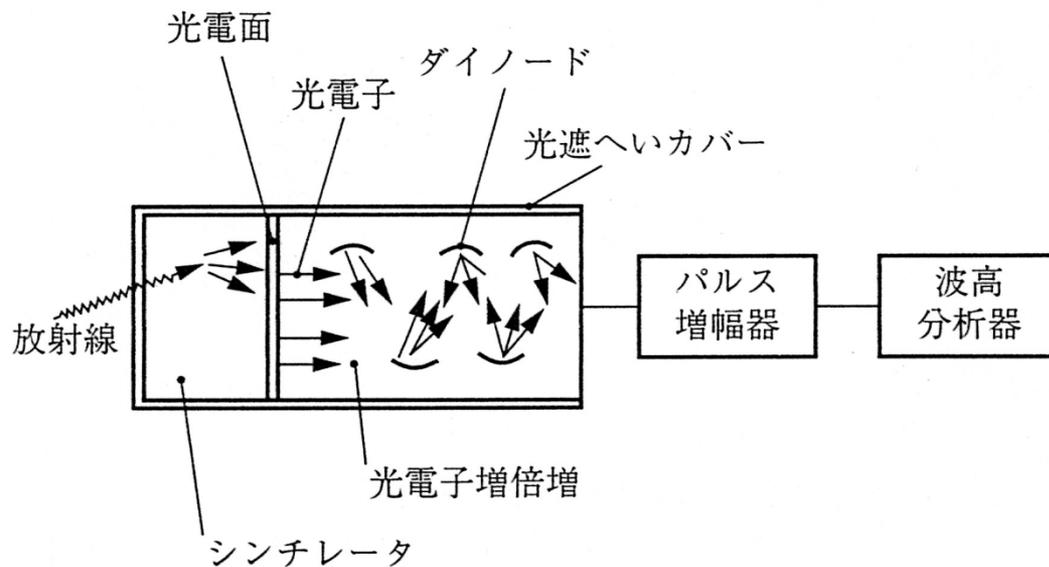
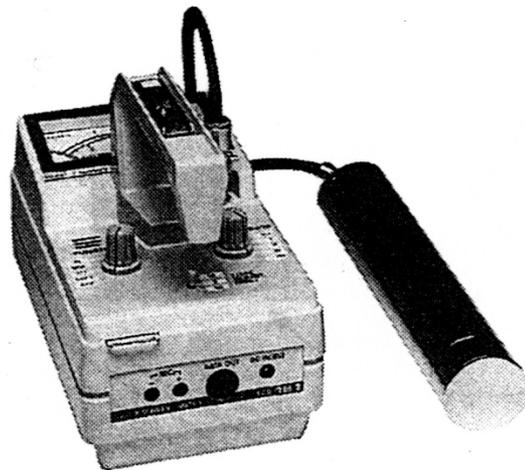
中性子検出器(BF₃比例計数管)



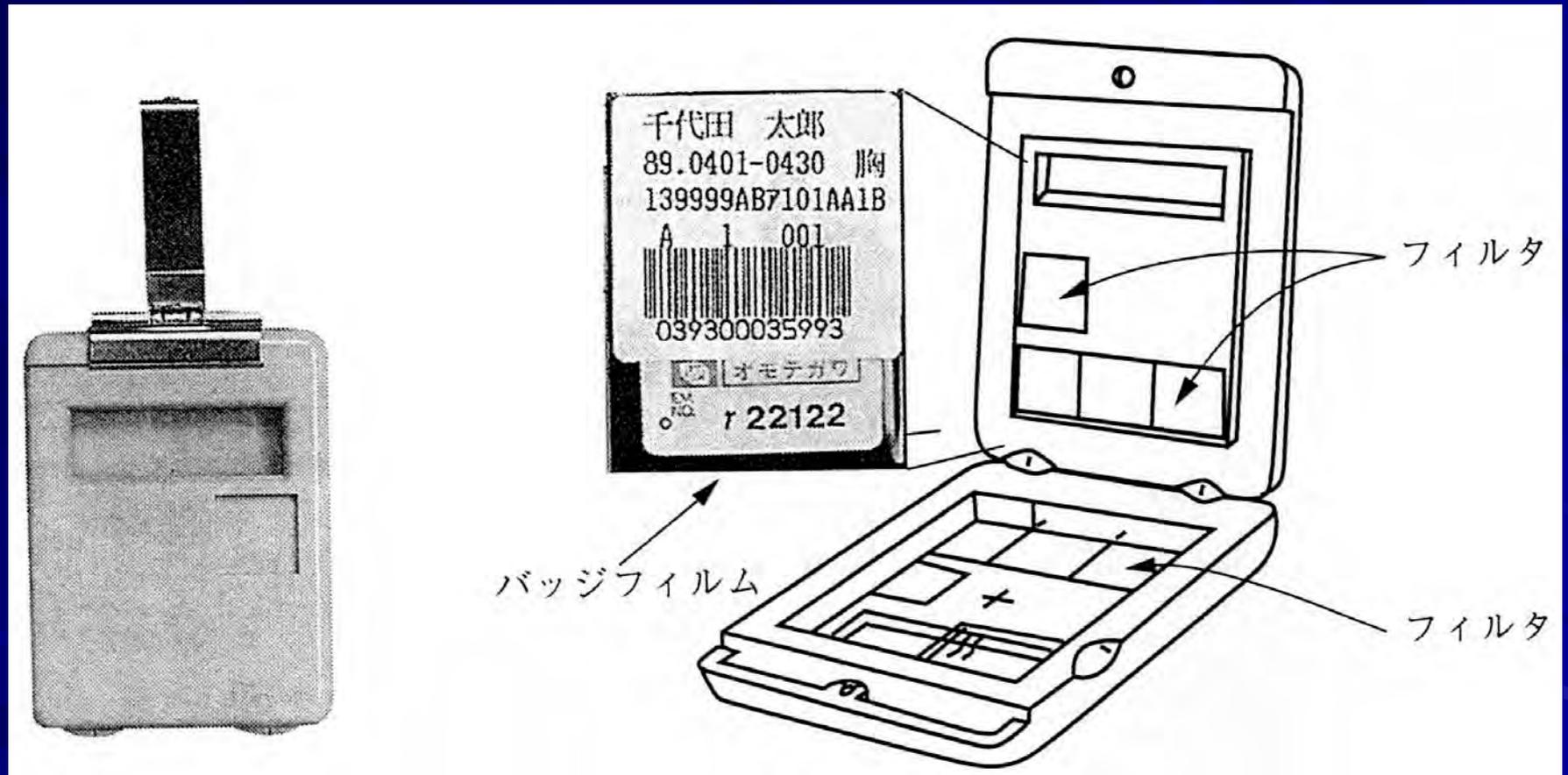
電子式ポケット線量計



シンチレーション検出器

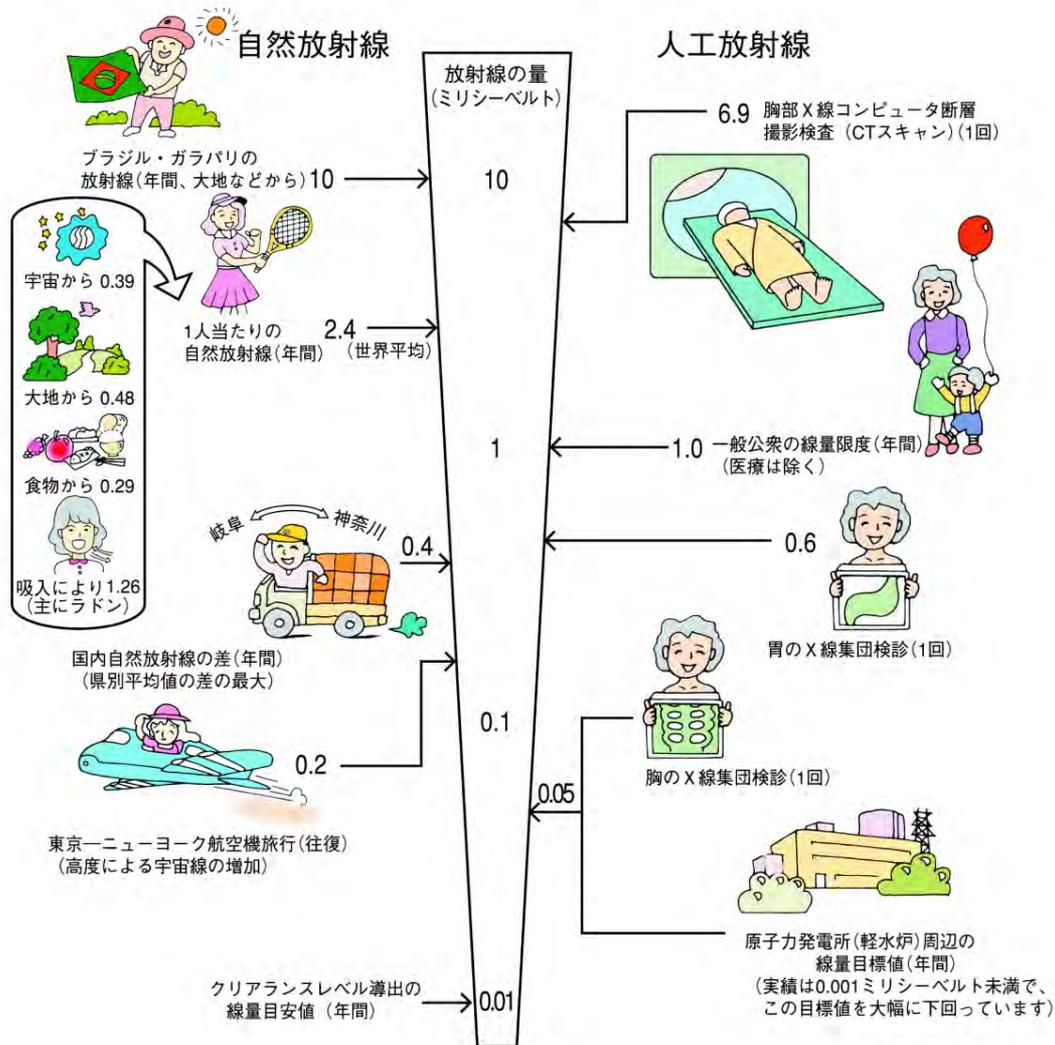


フィルムバッジ



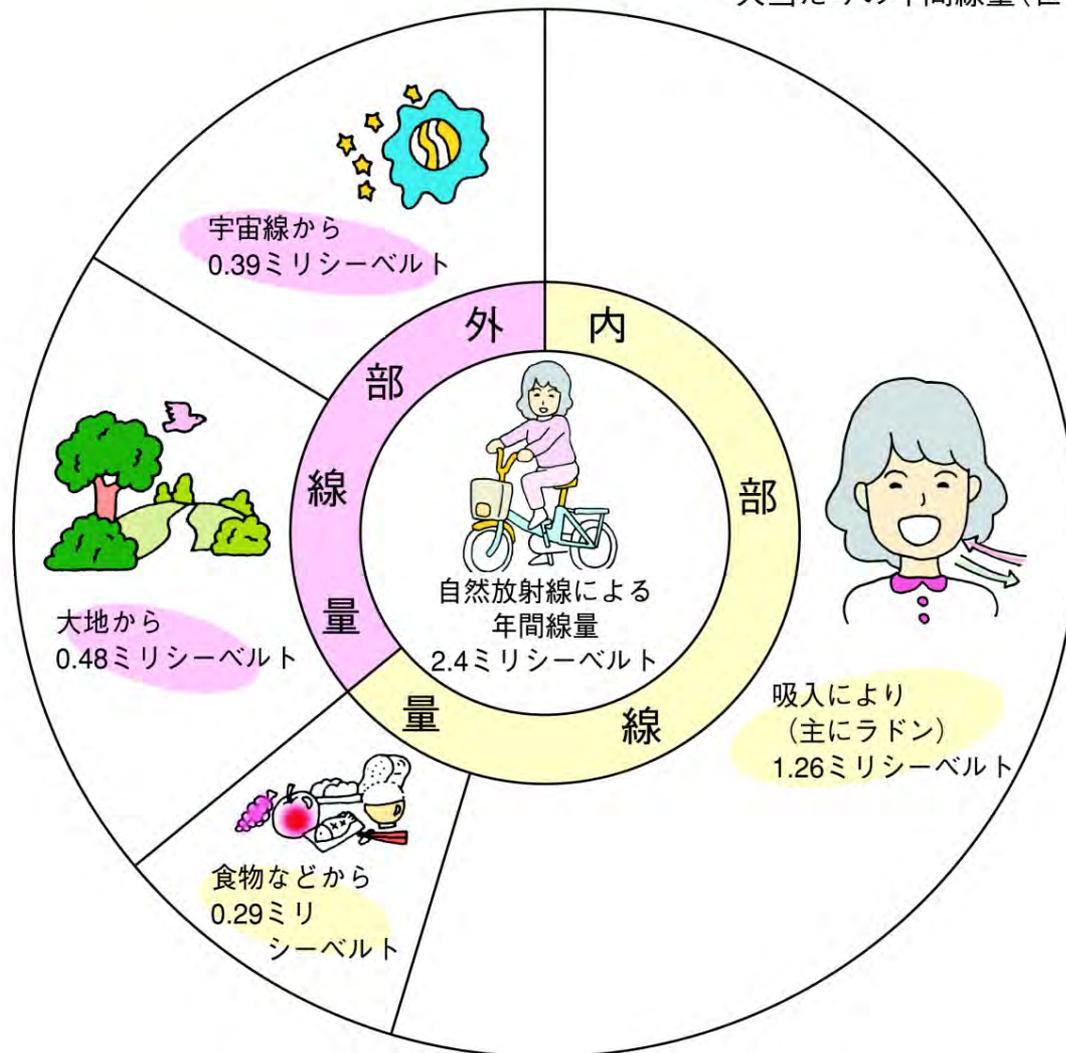
2. 自然界の放射能

日常生活と放射線



自然放射線から受ける線量

一人当たりの年間線量(世界平均)



出典：国連科学委員会(UNSCEAR)2000年報告

体内、食物中の自然放射性物質

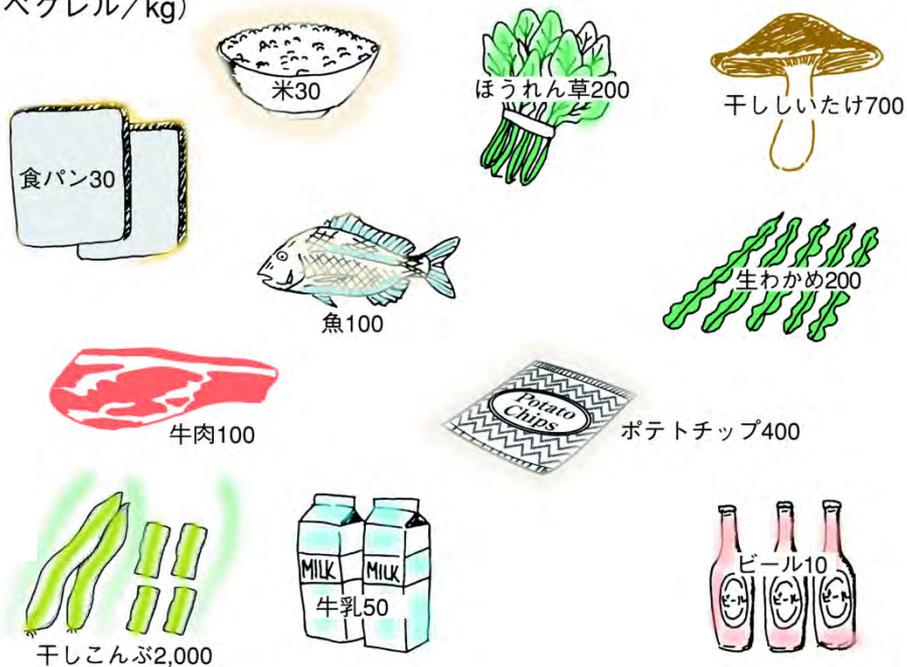
●体内の放射性物質の量

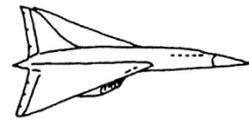
(体重60kgの
日本人の場合)

カリウム40	4,000ベクレル
炭素14	2,500ベクレル
ルビジウム87	500ベクレル
鉛210・ポロニウム210	20ベクレル

●食物中のカリウム40の放射能量(日本)

(ベクレル/kg)





20,000m

20,000m
13 μ Sv/時間

15,000m



10,000m

12,000m
5 μ Sv/時間

5,000m

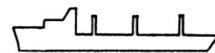


4,000m

○ 0.2 μ Sv/時間

2,000m

○ 0.1 μ Sv/時間



海面 ○ 0.03 μ Sv/時間

注) μ Sv = マイクロシーベルト
(ミリシーベルトの千分の1)

3. 放射線の人体影響

組織加重係数(ICRP Pub.103, 2007)

組織	組織加重係数	組織	組織加重係数
骨髄(赤色)	0.12	肝臓	0.04
結腸	0.12	甲状腺	0.04
肺	0.12	骨表面	0.01
胃	0.12	脳	0.01
乳房	0.12	唾液腺	0.01
生殖腺	0.08	皮膚	0.01
膀胱	0.04	残りの組織	0.12
食道	0.04	合計	1.00

確定的影響と確率的影響

➤ 確定的影響

- 一定量以上の線量を被ばくしたときのみ現れる影響(しきい値線量がある影響)
- 発がん、遺傳的影響以外の全て

➤ 確率的影響

- 発がん、遺傳的影響
どんなに少ない線量でも起こり得る、また、被ばく線量に応じて発生頻度が増加すると考えられている影響
(しきい値がないと仮定されている影響)

放射線全身被ばくによる急性影響

線量	症 状
0.25Gy	臨床的症候なし
0.5Gy	リンパ球の減少
1.5Gy	放射線宿酔
4Gy	1~2ヶ月以内に死亡*(骨髄死)(ヒトの半数致死線量)
7Gy	ヒトの100%致死線量*
15Gy程度	2週間以内に100%死亡(腸死)
50Gy以上	1~2日で100%死亡((中枢)神経死)

*骨髄移植、無菌治療などを行わない場合

放射線被ばく線量と発がんの関係

- 原爆被爆者のデータから100mSv以上では線量とともにがんが増加することは確か
 - それ以下の線量では、統計的に有意な増加が確認できない
 - 一方で、ある一定線量以下では、がんが増加しないというコンセンサスも得られていない
あったとしても、現時点では決定できない
- 防護上は、「厳しい」直線しきい値なし仮説を採用

法令で定められた線量限度

- 職業被ばく: 100mSv/5年 (平均20mSv/h),
 - 年間50mSvまで許容
 - 緊急作業の場合: 100mSv
 - 今回の緊急事態に限り250mSvに引き上げ
- 公衆被ばく: 年間 1mSv
 - × 医療被ばく: 限度なし

被曝線量

- 同じ線量でも浴び方によって影響は異なる
 - 一気に被ばくすると影響が大きい
 - 分割した場合、長期にわたって少しずつ連続的に浴びた場合は、影響が小さい

放射線から体を守るしくみ

- DNA修復 : DNAの傷を治す
- 細胞周期チェックポイント : DNA複製・分配を止める
- アポトーシス : 細胞が自発的に死ぬ

暫定規制値

- 従来の食品衛生法には放射能を含む食品に対する規制なし
 - 今回、以前からあった原子力安全委員会の指針の導入
- 基準
 - その放射能を含む食物(あるいは水)を摂取しはじめてから、1年間摂取し続けたとき、被曝する放射線量が5mSv以下
 - ただし、ヨウ素の場合、甲状腺における等価線量が50mSv以下

暫定規制値(単位: Bq/kg)

カテゴリー	ヨウ素	セシウム	ウラン
飲料水	300	200	20
牛乳・乳製品	300	200	20
野菜類	2000 ^a	500	100
穀類	-	500	100
肉・卵・魚他	- ^b	500	100

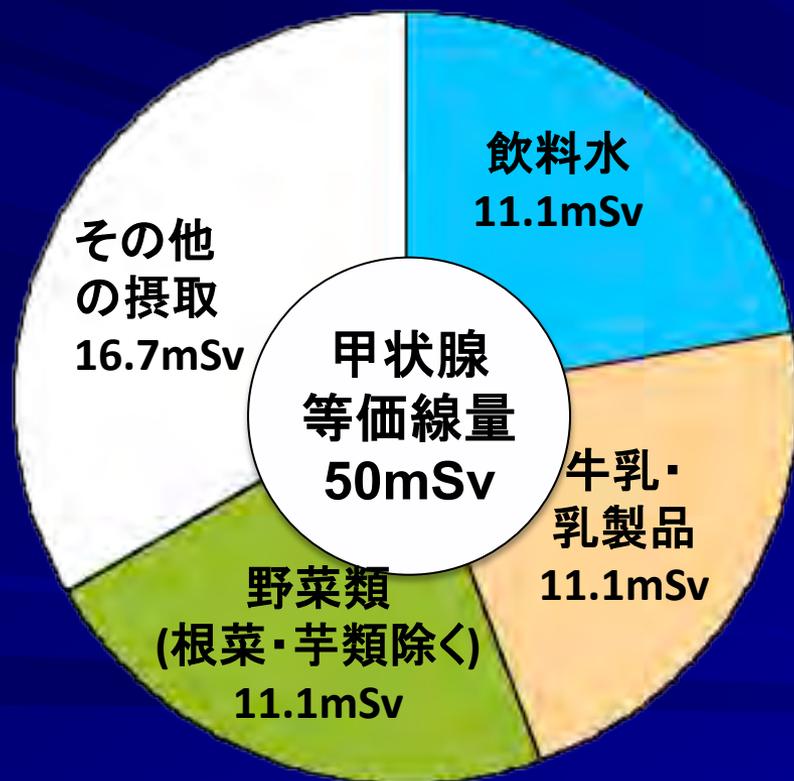
a 根菜・芋類を除く

b 4/5に魚に対して2000Bq/kgと制定

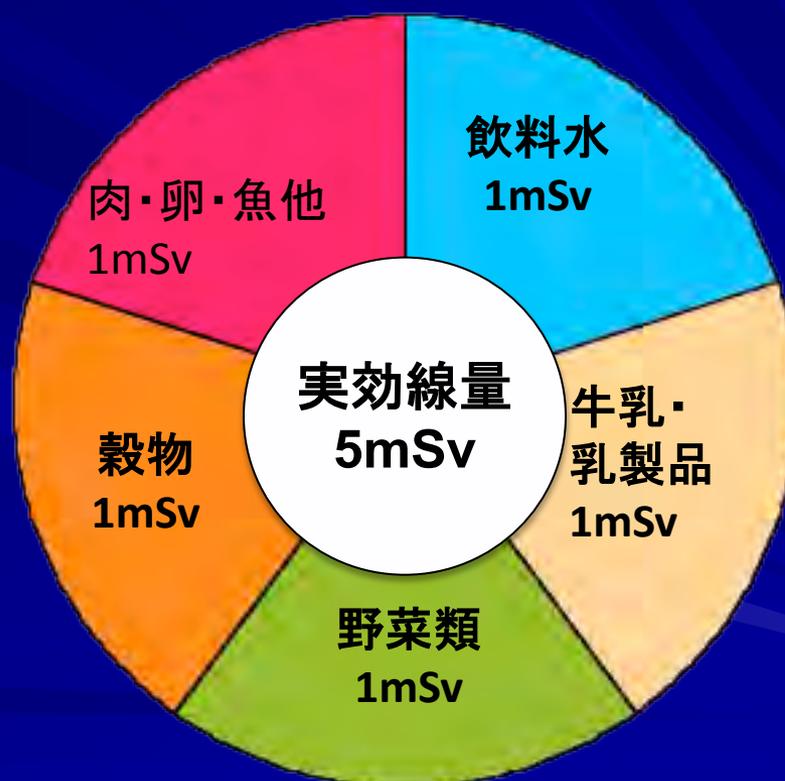
暫定規制値の決め方

- ・飲料水・食物を5つのカテゴリーに分ける
- ・それぞれのカテゴリーごとに線量の上限値を割り振る

ヨウ素の場合



セシウム・ウランの場合



食品の新基準値

新たな基準値の概要

放射性物質を含む食品からの被ばく線量の上限を、年間5ミリシーベルトから年間1ミリシーベルトに引き下げ、これをもとに放射性セシウムの基準値を設定しました。

○放射性セシウムの暫定規制値

食品群	規制値 (単位:ベクレル/kg)
野菜類	500
穀類	
肉・卵・魚・その他	
牛乳・乳製品	200
飲料水	200

※ 放射性ストロンチウムを含めて規制値を設定



- 食品の区分を変更
- 年間線量の上限を引き下げ

○放射性セシウムの新基準値

食品群	基準値 (単位:ベクレル/kg)
一般食品	100
乳児用食品	50
牛乳	50
飲料水	10

※放射性ストロンチウム、プルトニウムなどを含めて基準値を設定

平成24年4月1日より施行

新たな基準値設定の考え方

年間の線量の上限值1ミリシーベルトから、飲料水による線量（約0.1ミリシーベルト）を引き、残りの線量を一般食品（乳児用食品、牛乳を含む）に割り当てます。

①「一般食品」の基準値

まず、年齢や性別などにより10区分に分け、それぞれの区分ごとに一般食品の摂取量と体格や代謝を考慮した係数を使って限度値を算出しました。その結果から、最も厳しい値（13～18歳の男性：120ベクレル/kg）を下回る、**100ベクレル/kg**を全区分の基準としました。これは、**乳幼児をはじめ、すべての世代に配慮した基準**です。



② 「乳児用食品」「牛乳」の基準値

放射線への感受性が高い可能性がある子どもへの配慮から、独立の区分とし、「一般食品」の半分の**50ベクレル/kg**としています。

乳児用食品の範囲

乳児用調製粉乳



乳幼児を対象とした調製粉乳

フォローアップ
ミルクなどの
粉ミルクを含む



乳幼児向け飲料



飲用茶に該当する飲料は飲料水の基準を適用

乳幼児用食品

おやつなど



ベビーフード



その他

服薬補助ゼリー 栄養食品
など



- 表示内容により、乳児向けの食品と認識されるものは、「乳児用食品」の区分に含まれます。

牛乳の範囲

「牛乳」の区分に含む食品

牛乳、低脂肪乳、加工乳等 乳飲料



「一般食品」の区分に含む食品

乳酸菌飲料 発酵乳 チーズ



- 消費者から牛乳と同類の商品と認識されている乳飲料（牛乳や加工乳にビタミン類やミネラル類を添加したものは、「牛乳」の区分に含まれます。
- 乳酸菌飲料、ヨーグルトなどの発酵乳、チーズなどは「一般食品」の区分に含まれます。

③ 「飲料水」の基準値

すべての人が摂取しにくく代替がきかず、摂取量が多いことから、WHO（世界保健機関）が示している基準を踏まえ、**10ベクレル/kg**としています。

干しいたけ、お茶などの取り扱い

加工食品などについては、原材料だけでなく、製造・加工された状態でも一般食品の基準を満たす必要があります。ただし、以下の食品については、実際に食べる状態を考慮して基準値が適用されます。

乾燥きのこと類、乾燥海藻類、乾燥魚介類、乾燥野菜など 原材料を乾燥させた状態で流通するが、水で戻して食べる食品	原材料の状態と食べる状態（水で戻した状態）の両方で、一般食品の基準値が適用されます。
お茶、こめ油など 原料から抽出して飲んだり、使用したりする食品	お茶（緑茶）は、飲む状態で飲料水の基準値が適用されます。米ぬかや菜種などを原料とする油は、油として一般食品の基準値が適用されます。

経過措置

新たな基準値は、平成24年4月1日からの施行ですが、市場に混乱が起きないように、準備期間が必要な食品については一定の期間、暫定規制値が適用されます。

米・牛肉 ▶平成24年9月30日まで

大豆 ▶平成24年12月31日まで

※暫定規制値が適用される期間内に製造・加工された食品は、賞味期限までは流通が認められます。

※暫定規制値に適合している食品は、健康への影響はないと一般的に評価され、安全性は確保されています。

4. 除染技術

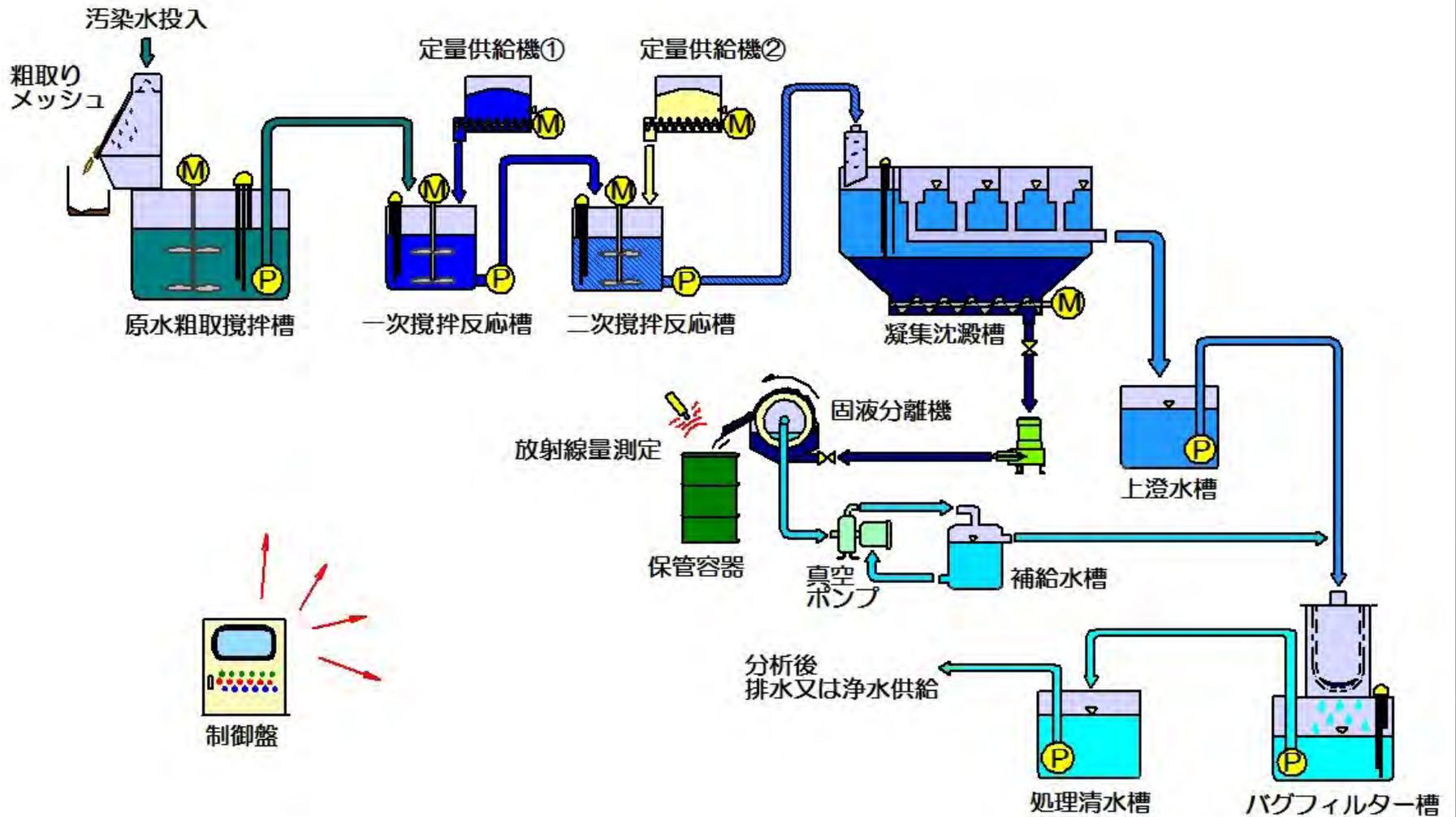
4.1 汚染水除染技術

- ▶ 東京工業大学有富研究室とNPO再生舎の共同開発
 - アスファルト切断汚濁水の処理システムの開発が原点
 - 凝集沈降剤の開発(イオンリアクション)
 - 凝集沈降法による固液分離技術の開発
 - アスファルト切断汚水処理システムを完成(定置型とモバイル型)
 - 福島原発事故で汚染された溜まり水の除染技術へ発展させ、農業用水の供給を目指す
 - 家屋、瓦礫や道路等を洗浄した汚染水の除染技術へ発展させ、農業水道や下水道へ流せる水に浄化を目指す

- 放射能汚染水浄化プラントの開発
 - 分解してトラックで運搬し、現地で据え付けられる定置型浄化プラント(処理能力:10t/h)
 - 4トトラックの搭載し、簡単に移動して浄化できるモバイル型浄化装置(処理能力:2t/h)
- 凝集沈降剤の開発：様々な形態の放射能汚染水がある
 - イオン化されたCsを凝集沈降できるフェロシアン化鉄が配合された凝集沈降剤
 - 微生物に吸収されたり、細かい土に吸着されたCsを凝集沈降できる凝集沈降剤
 - 凝集沈降され固液分離される放射性廃棄物を少なくするためにプラントに最適な凝集沈降剤の組成と配分量を最適化できる技術の確立

- NPO再生舎の会員会社が高圧水洗浄技術と超高圧水ハツリ除染技術を開発
 - + モバイル型汚染水浄化装置
 - 東京工業大学の近くの小学校のホットスポット（水はけの悪い土壌とU字側溝）の除染試験
 - ・ 高レベル汚染土壌は遮水性袋に詰め地下に埋設
 - ・ 側溝を洗浄した汚染水はアスファルト切断汚濁水処理装置で浄化
 - 浄化水は排水基準以下に除染
 - 処理水は洗浄水として再利用し、最後は排水基準値以下であることを計測して放流
- JAEAの除染委託事業に応募して、本宮市の小学校のプールと周辺の完全除染

放射能汚染水浄化システム





処理水

- 福島県本宮市の小学校のプール水の除染に適用
- プール水での簡易試験を行いフェロシアン化鉄配合凝集沈澱剤の組成と配合量を決定
- 放射能汚染水処理プラントによる固液分離処理後、上澄み水は排水基準項目の測定後、安全を確認した上で放流
- 脱水後の残渣物は保管容器に格納し保管



大プール



小プール

実証試験結果

- (1) プール水240m³を処理した結果、原水放射線量34Bq/l～1,116Bq/lに対して浄化水の放射線量は検出限界値(概ね10Bq/l)以下に除染フェロシアン化鉄の配合如何に拘らず達成
→ プール水中にはイオン化したCsは存在しない
(微生物に吸収や細かい土に付着)
- (2) フェロシアン化鉄を配合した凝集沈降剤を使用した場合でも浄化水中に含まれるシアン濃度は排水基準(5mg/l)以下
- (3) 脱水汚泥, 原水, 浄化水とも⁶⁰Coおよび⁵⁴Mnは不検出
- (4) 今回発生した脱水汚泥は, 29100Bq/kg～683000Bq/kgであり, 埋め立てはできない

実証試験結果

- (1) プール水 240m^3 を処理した結果、原水放射線量 $34\text{Bq}/\ell \sim 1,116\text{Bq}/\ell$ に対して浄化水の放射線量は検出限界値(概ね $10\text{Bq}/\ell$)以下に除染, 透視度は 1m 以上
フェロシアン化鉄の配合如何に拘らず達成
→ プール水中にはイオン化したCsは存在しない
(微生物に吸収や細かい土に付着)
- (2) フェロシアン化鉄を配合した凝集沈降剤を使用した場合でも浄化水中に含まれるシアン濃度は排水基準($0.5\text{mg}/\ell$)以下
- (3) 脱水汚泥, 原水, 浄化水とも ^{60}Co および ^{54}Mn は不検出

- (4) 今回発生した脱水汚泥は、29,100Bq/kg～683,000Bq/kgであり、埋め立てはできない
(埋設可能な線量: 8,000Bq/kg)
- (5) 廃棄物溶出試験(昭和48年環境庁告示第13号)の結果、シアンが溶出基準1mg/lを超過し、特別管理廃棄物となる
→ フェロシアン化鉄の配合比率の低下が必要
- (6) プール水の場合、上部の線量は高くないが、下部に沈降する浮遊物質と底面の汚泥の放射線量が高いので、汚染水の処理に対する原水の放射線量の管理が重要
- (7) 固液分離された脱水汚泥のセシウムの水の浸透に対する保持能力は高い

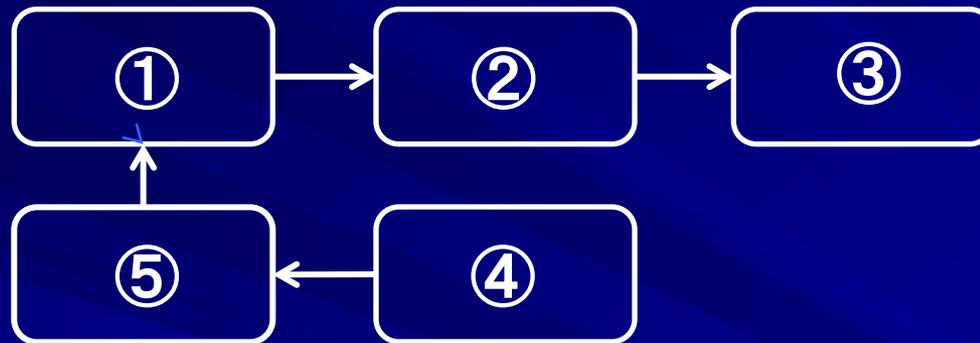
プラント処理能力

	プラント処理能力
処理量	10m ³ /h
凝集剤	0.20%
原水放射線量	34Bq/ℓ～1116Bq/ℓ
浄化水放射線量	ND
脱水汚泥放射線量	29100 Bq/kg～683000 Bq/kg
シアン	0.28mg/ℓ～0.44 mg/ℓ(フェロシアン化鉄20%配合)
浮遊物質	7 mg/ℓ～9 mg/ℓ
透視度	0.7m～1.1m

4.2 高圧水洗浄除染技術

- 家屋，道路や瓦礫などを洗浄した汚染水を浄化
 - 高圧水洗浄技術の開発
(日進工業株式会社)
 - 東京工業大学有富研究室とNPO再生舎の共同
共同開発を実施
 - 大田区の小学校のU字側溝の除染
+ 本宮市の小学校のプール周辺のコンクリー
ト床，雨水側溝の除染で実証試験
- コンクリート床とアスファルト舗装版の表面除染効果
の比較
 - 超高圧水による表面0.5mm程度のハツリ除染

高圧水洗浄除染システム



- ① 浄水タンク
- ② ウォータージェット装置
- ③ ウォータージェット供給装置
- ④ 汚染水回収装置
- ⑤ モバイル型放射能汚染水浄化システム

高圧水洗浄水除染システムの仕様

区分	洗浄方法	圧力	流量
高圧	ハンドガン	30MPa	20ℓ/min
	自走車積載回転ノズル	30MPa	20ℓ/min
超高圧	ハンドアクアブラスト	250MPa	25ℓ/min
	スピンジェット	280MPa	45ℓ/min

高圧水洗浄除染システム



高圧水ポンプ



超高圧水ポンプ

高圧水洗浄装置



高圧水自走車積載
回転ノズル洗浄装置



高圧水ハンドガン
洗浄装置

超高压水洗净装置



超高压水
ハンドアクアブラスト

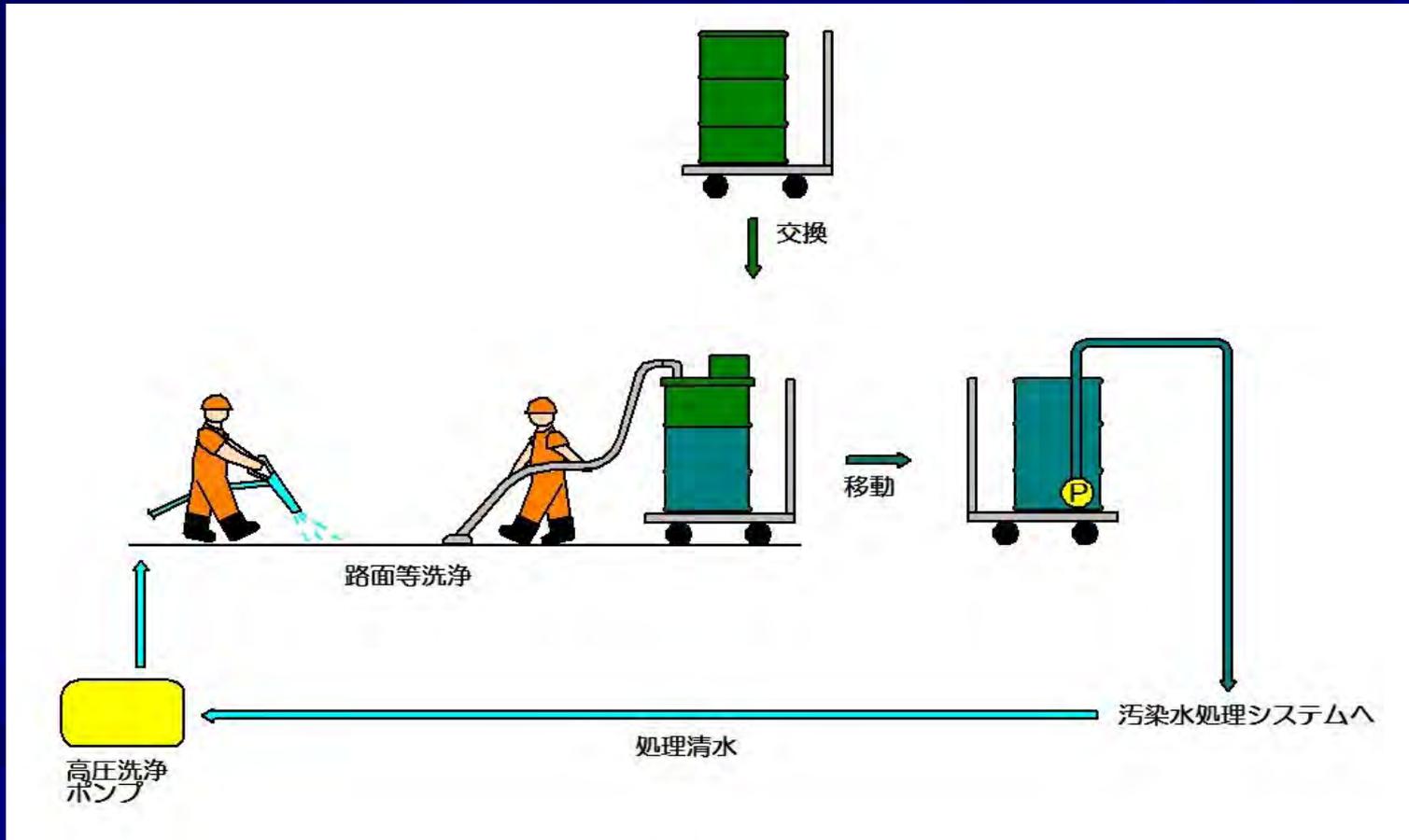


超高压水
スピンジェット

高压水洗净除染水回收装置



高圧水ジェットガンによる洗浄



実証試験結果

- (1) 高圧水洗浄では除染率は概ね45%程度
- (2) 除染対象の表面に傷や割れがある場合には、除染効果が低下
 - ・ 雨水側溝で顕著：継ぎ目やヒビ
- (3) 超高圧水洗浄を行なった路面は表面汚染密度は $2\text{Bq}/\text{cm}^2$ 以下まで低下
 - － 道路の路面や大きな瓦礫の除染に効果を発揮
- (4) 3tトラックに搭載できるアスファルト切断汚泥水処理装置を改造した設備では凝集沈殿槽を持たなかったため、処理能力が $170\text{l}/\text{h}$ と低かった
 - 4tトラック搭載でき、 $2\text{m}^3/\text{h}$ の処理能力を持つ、凝集沈降槽を加えた稼働型汚染水処置装置を開発

稼働型汚染水処理装置（4tトラック搭載）



➤ 開発した稼働型汚染水処理装置

- 4tトラック搭載用装置の処理能力は $2\text{m}^3/\text{h}$
- 2tトラック搭載用装置の処理能力は $0.6\text{m}^3/\text{h}$

4.3 稼働型汚染水処置装置を用いた実証試験

- ▶ 南相馬汚染水処理事業組合の依頼
 - ― 建屋，道路の洗浄による汚染水の除染実証試験
 - ― 池の汚染水の除染実証試験



建屋の洗浄（公民館）



道路の洗浄（ハートランド内）



建溜まり汚染水の洗淨(ハートランド内の池)

実証試験結果

- (1) 建屋、道路の洗浄水と池の溜まり水の線量は154Bq/ℓから1,067Bq/ℓであったが、イオン化しているCsは殆ど存在せず、フェロシアン化鉄を配合していない凝集沈降剤でも15.5Bq/ℓ以下に除染可能であった。
- (2) 凝集沈降剤の投入量を0.05, 0.1, 0.2%とパラメータとして実験した結果、除染水の線量を10Bq/ℓ以下にするためには0.1%以上が必要である。
- (3) 建屋の高圧水洗浄は除染効果は低いが発生する汚染水の線量は1,000Bq/ℓを超える。
- (4) 道路の高圧水洗浄では30MPa以上の圧力が必要である。

ご清聴有難うございました！