日本原子力学会・バックエンド部会週末基礎セミナー

福島環境汚染の状況と修復見通しについて

- 放射能で汚染された地域の状況
- 修復基準
- 修復の手順と修復オプション
- 修復計画の作成
- 今後の問題点

原子力安全研究協会処分システム安全研究所
杤山　修

福島環境汚染の状況と修復見通しについて

- 放射能で汚染された地域の状況
- 修復基準
- 修復の手順と修復オプション
- 修復計画の作成
- 今後の問題点

放射性物質の環境への放出：北西方向の高線量地域を含め、広範に放射性物質が飛散

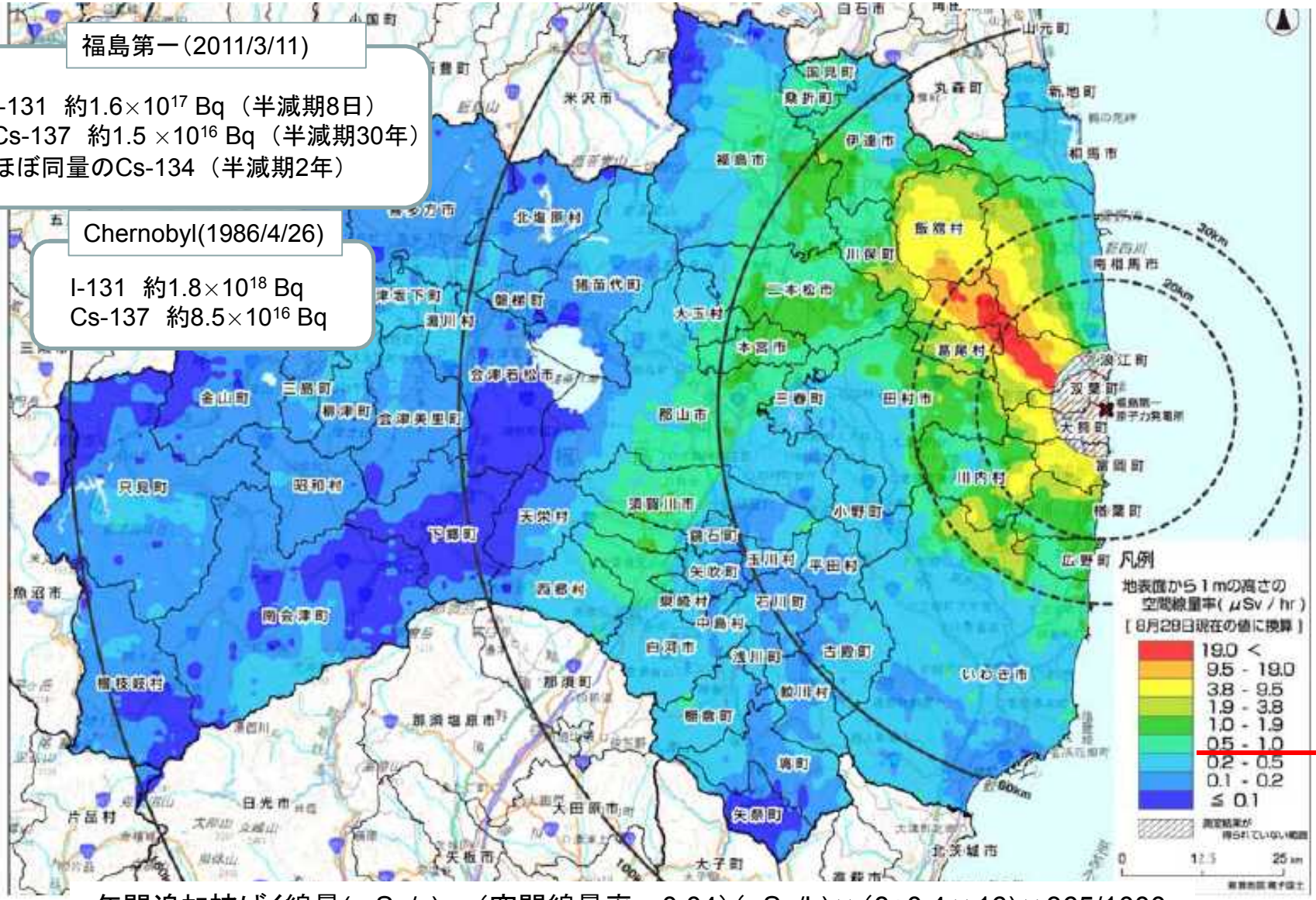
文部科学省による福島県西部の航空機モニタリングの測定結果について（福島県内の地表面から1m高さの空間線量率）（H23.9.12公表 8.28 現在の値に換算）

福島第一（2011/3/11）

I-131　約1.6×10^{17} Bq（半減期8日）
Cs-137　約1.5 ×10^{16} Bq（半減期30年）
ほぼ同量のCs-134（半減期2年）

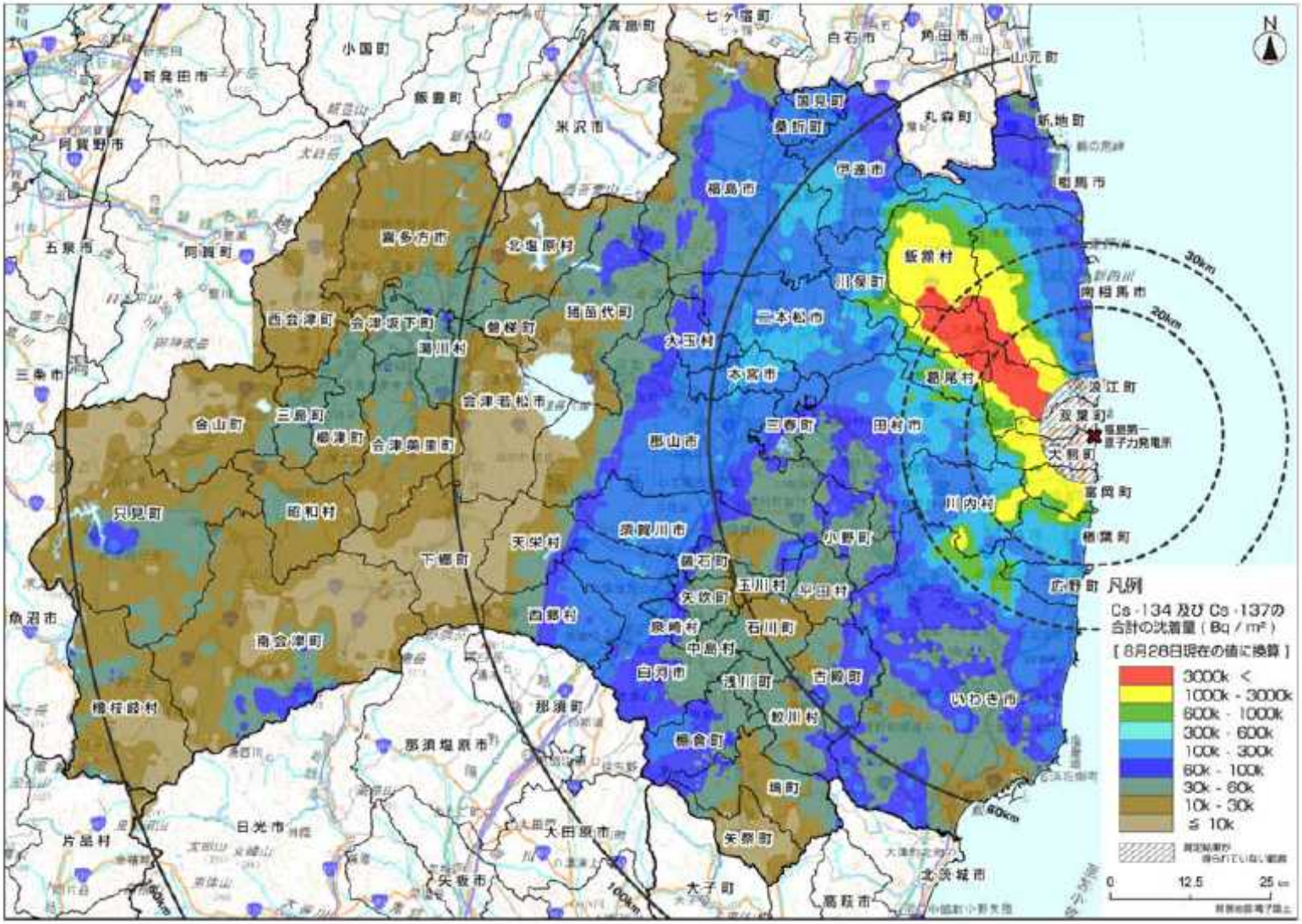
Chernobyl(1986/4/26)

I-131　約1.8×10^{18} Bq
Cs-137　約8.5×10^{16} Bq



•年間追加被ばく線量(mSv/y) =（空間線量率－0.04）(μSv/h)×（8+0.4×16)×365/1000
•追加1 mSv/y は0.23 μSv/hに対応

文部科学省による福島県西部の航空機モニタリングの測定結果について
（福島県内の地表面へのセシウム134、137の沈着量の合計）



μSv/h*

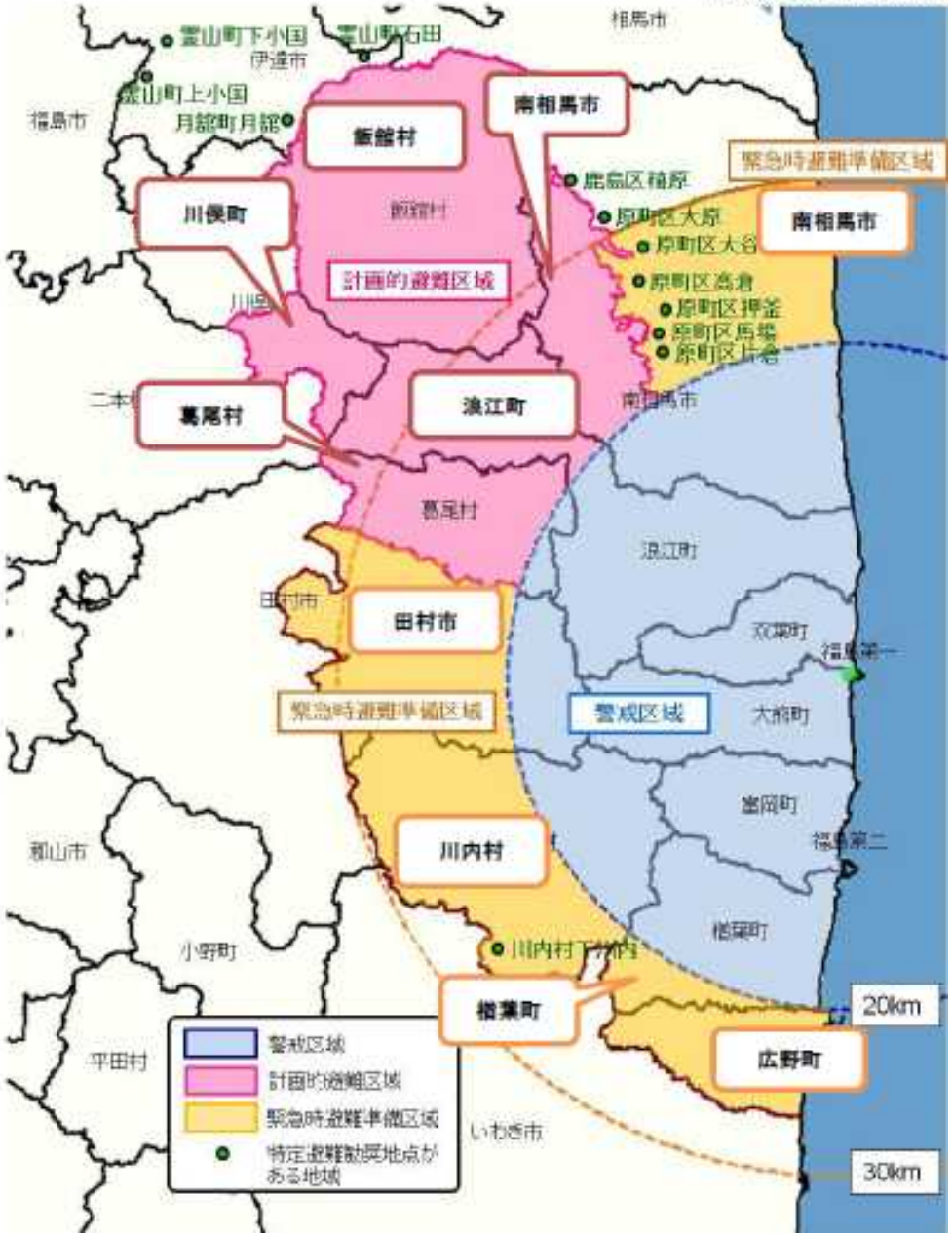
4.4 <
1.8 - 4.4
1.2 - 1.8
0.7 - 1.2
0.3 - 0.7
0.2 - 0.3
0.1 - 0.2
0.04 - 0.1
≦ 0.04

空間線量率と汚染の程度（沈着量はほぼ比例）

* log[μSv/h] =0.85log[Bq/kg] – 3.16 (環境省災害廃棄物安全評価検討会資料第3回資料3)
[kBq/kg] × 65 = [kBq/m^2]（安全委員会）

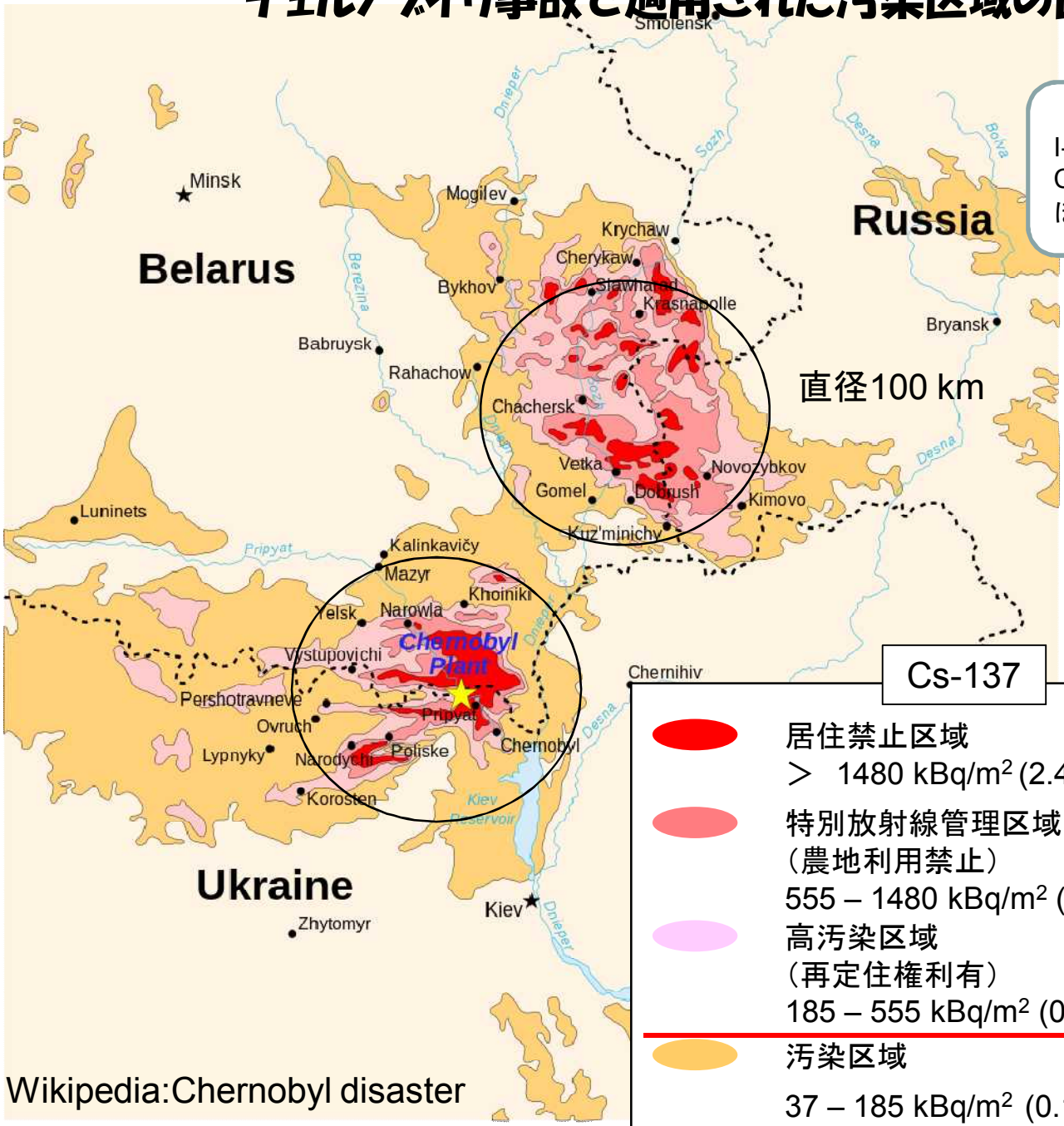
警戒区域、計画的避難区域、旧緊急時避難準備区域及び特定避難勧奨地点

警戒区域、計画的避難区域、緊急時避難準備区域及び特定避難勧奨地点がある地域の概要図
（平成23年8月3日現在）



避難区域	人口
警戒区域	7.8万人
計画的避難区域	1.0万人
緊急時避難準備区域（9月30日に解除）	5.8万人
合計	15万人

チェルノブイリ事故で適用された汚染区域の区分



Wikipedia:Chernobyl disaster

福島第一（2011/3/11）

I-131　約1.6×10^{17} Bq（半減期8日）
Cs-137　約1.5 ×10^{16} Bq（半減期30年）
ほぼ同量のCs-134（半減期2年）

Chernobyl(1986/4/26)

I-131　約1.8×10^{18} Bq
Cs-137　約8.5×10^{16} Bq

- 放出放射能は数分の1（固化時のガラス固化体約1本分）
- 汚染の広がり(影響面積）はチェルノブイリ事故の時の数分の1

Cs-137

- 居住禁止区域
  ＞　1480 kBq/m^2 (2.46 μSv/h)
- 特別放射線管理区域
  （農地利用禁止）
  555 – 1480 kBq/m^2 (1.11 - 2.46 μSv/h)
- 高汚染区域
  （再定住権利有）
  185 – 555 kBq/m^2 (0.45 – 1.11 μSv/h)
- 汚染区域
  37 – 185 kBq/m^2 (0.12 – 0.45 μSv/h)

チェルノブイリ事故で汚染されたヨーロッパの面積

TABLE 3.2. AREAS IN EUROPE CONTAMINATED BY CHERNOBYL FALLOUT IN 1986 [3.6, 3.13]

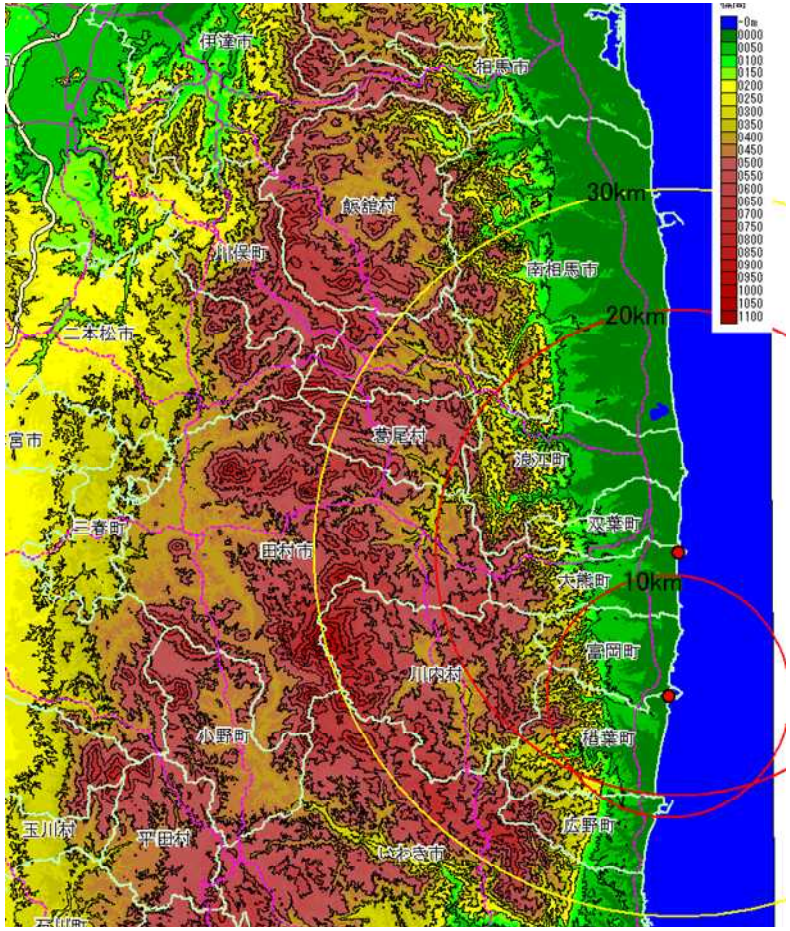
	Area with ^{137}Cs deposition density range (km^2)			
	37–185 kBq/m²	185–555 kBq/m²	555–1480 kBq/m²	>1480 kBq/m²
	0.1-0.5 μSv/h	0.5-1.1 μSv/h	1.1-2.5 μSv/h	>2.5 μSv/h
Russian Federation	49 800	5 700	2100	300
Belarus	29 900	10 200	4200	2200
Ukraine	37 200	3 200	900	600
Sweden	12 000	—	—	—
Finland	11 500	—		
Austria	8 600	—	—	—
Norway	5 200			
Bulgaria	4 800			
Switzerland	1 300			
Greece	1 200			
Slovenia	300			
Italy	300	—	—	—
Republic of Moldova	60	—	—	—

555 kBq/m² を超える地域 ～ 10,300 km²

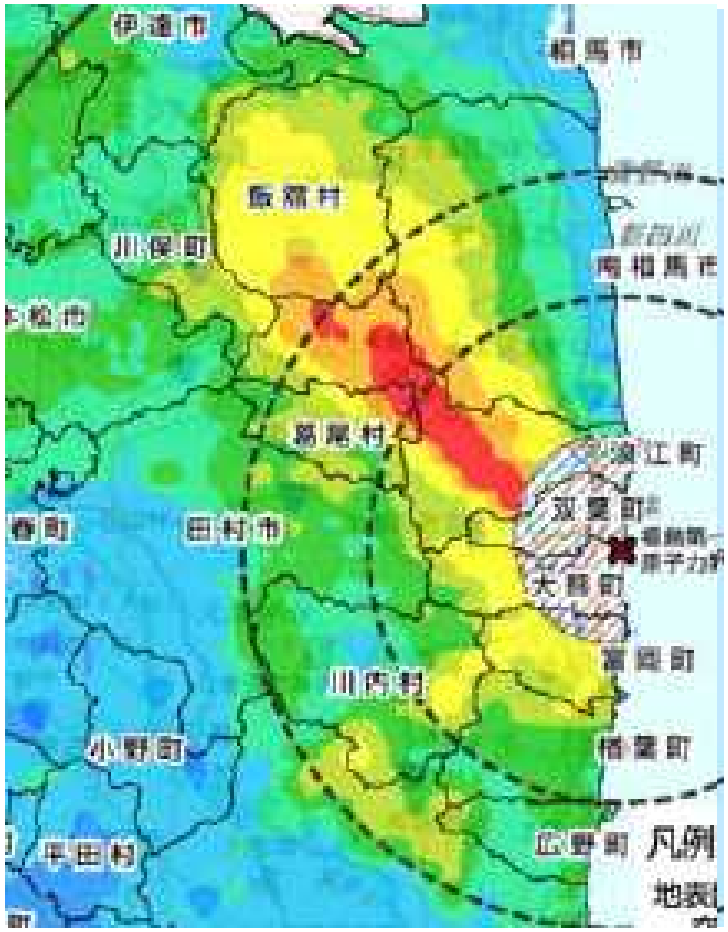
- 福島県全体で
  > 1 μSv/h: 2,373 km² (うち森林62.6 %, 農地26.5 %)
  > 8 μSv/h: 490 km² (うち森林68.5 %, 農地20.4 %)
  （環境省第2回環境回復検討会 2011/09/27 資料7
  http://www.env.go.jp/jishin/rmp/conf/02-mat4.pdf ）

IAEA STI/PUB/1239: Environmental Consequences of the Chernobyl Accident and their remediation: Twenty Years of Experience (2006)

汚染地域の地勢、汚染されたもの(サイト外)



埼玉大学谷謙二研究室ホームページより



文部科学省による航空機モニタリングの結果
（Cs-134 + Cs-137, 8月28日現在の値に換算）

① 市街地、②農耕牧畜地、③森林、山林、④水系等の環境が広範囲に汚染

サイト内からも核燃料、構造材料、コンクリート、汚染水、汚染土壌、汚染地下水等高放射能レベルの廃棄物が大量に発生し、廃棄体化、処分の問題がある。

汚染により発生すると想定される廃棄物の量

発電所サイト内

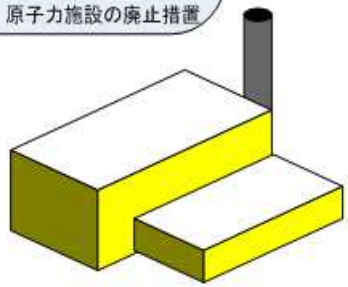
通常の廃止措置で発生する廃棄物の量
（110万kW級BWRの場合）

- 低レベル放射性廃棄物
  約2%以下（約1.3万トン）
- 放射性廃棄物として扱う必要のない廃棄物
  約5%（約2.8万トン）
- 放射性廃棄物でない廃棄物
  93%（約49.5万トン）

出典　原子力安全・保安院　原子力施設の廃止措置

放射性廃棄物として扱う必要のない廃棄物および放射性廃棄物でない廃棄物は、産業廃棄物として扱われ、再利用が可能であったが、事故により汚染

サイト内で大量の放射性廃棄物の発生



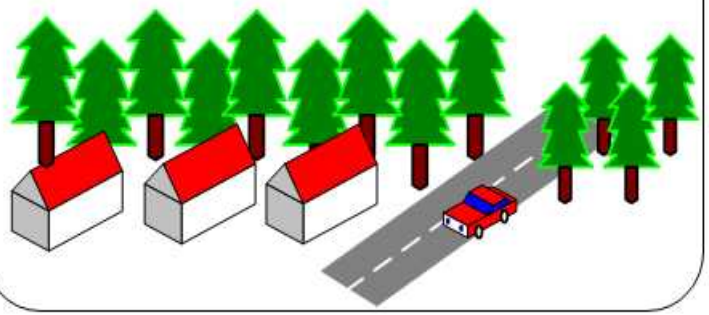
発電所サイト外

- 汚染土壌

  例えば5mSv/y以上を面的除染(森林含む)し、1-5 mSv/yをスポット除染(森林除く)すると、2900万m^3（東京ドーム23杯分）となる。（環境省環境回復検討会第2回資料7 (H23.9.27)）
- がれき（約290万トン）（2011.6.14 環境省）
- 災害廃棄物

  都市ごみ焼却灰、下水汚泥、稲わら、がれき等）：数十万m^3

サイト外で大量の放射性廃棄物の発生



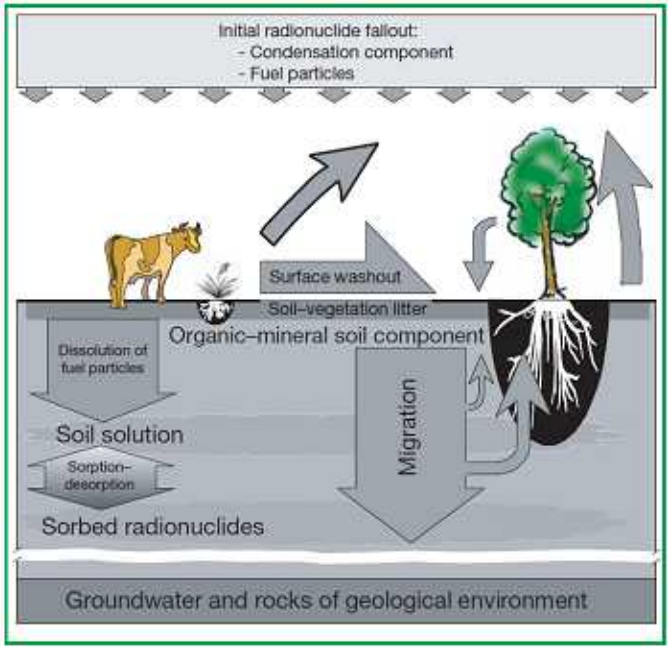
2048年頃までの放射性廃棄物の発生量として、高レベル放射性廃棄物：4.3万本、TRU廃棄物：約71万本（約14万m^3）、ウラン廃棄物：約43万本（約8.5万m^3）、発電所廃棄物（高、低、極低）：約275万本（約55万m^3）、研究施設等廃棄物：約35万本（約7万m^3）が想定されている。

出典　新計画策定会議（第19回）資料第2号「放射性廃棄物処理処分について」より

平常時の数十年分を超える量の放射性廃棄物、汚染物が発生

セシウム(Cs)の性質

- アルカリ金属(カリウム(K)やナトリウム(Na))などと類似
  水中では1価陽イオン(Cs^+)として存在
- 塩は水に溶けやすい(Cs^+は錯形成しない、沈殿しない)。生体内では移動しやすい(K^+と類似の挙動)(生物学的半減期＝数か月～半年)
- 土壌中の粘土成分に強く吸着する($Cs^+ > K^+ > Na^+$)
  K_d ＝ 土壌中の濃度(Bq/kg)／水中の濃度(Bq/L)
  $\sim 10^3$ (L / kg)
  深さ方向への移動は極めて遅くほとんどが表層土壌に蓄積する
  → 校庭、公園の土壌表層
- 粘土質を含む汚泥に集まりやすい
  → 上下水処理での汚泥、側溝の汚泥
- 微粒子状の懸濁物、塵となって流水、風と共に移動
- 高温では塩化物等の陰イオンとともに揮発する
  (CsClの沸点　1290 ℃)
- 都市ごみの焼却では、主灰(bottom ash)、飛灰(fly ash)に分布
  排ガス中のセシウムはバグフィルターで集塵できる。飛灰からは溶出しやすい。
- 動植物への移行は1/10 ～ 1/100程度

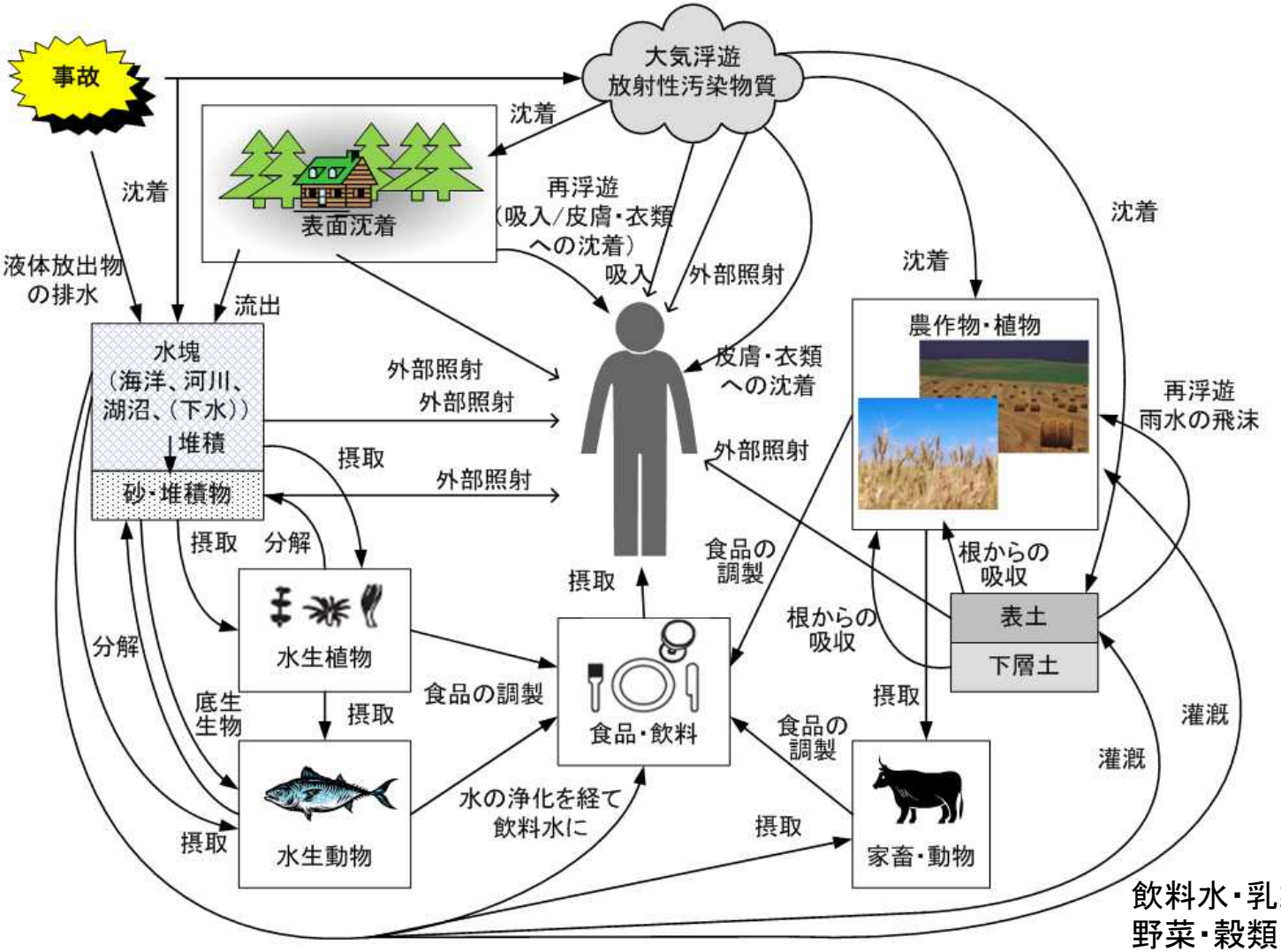


Cs-137　半減期30年
Cs-134　半減期 2 年

IAEA　Technical Report Series 472: Handbook of Parameter Values for the Prediction of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environments (2010)
IAEA Technical Document 1616: Quantification of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environments for Radiological Assessments(2009)

福島第１発電所の事故に伴う放射能汚染の経路

被ばく経路（被ばくシナリオ）を把握して被ばくを管理する（経路ごとに境界がある）



暫定基準
飲料水・乳製品　200 Bq/kg
野菜・穀類・肉・魚等 500 Bq/kg

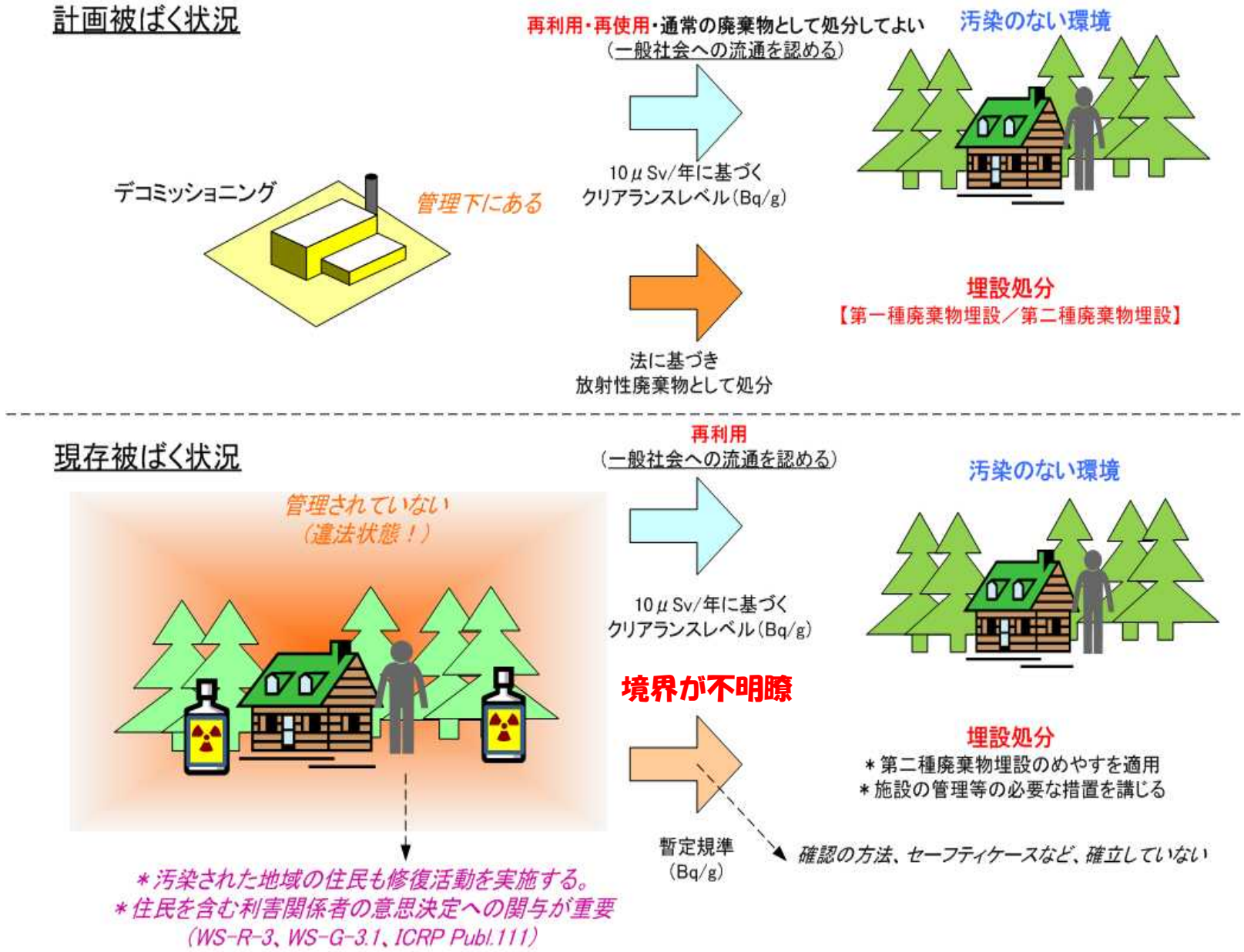
IAEA　Safaty Standards Series RS-G-1.8: Environmental and Source Monitoring for Purposes of Radiation Protection(2005) の図に基づき作図

福島環境汚染の状況と修復見通しについて

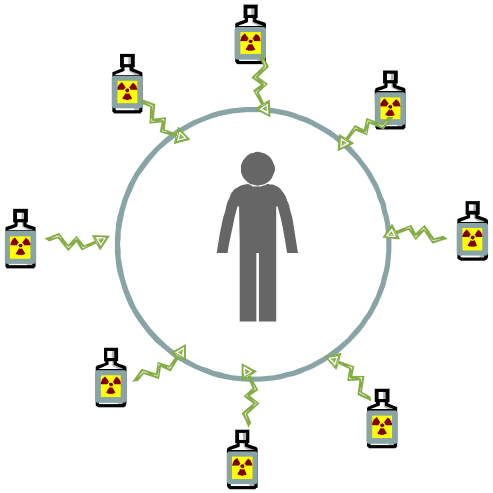
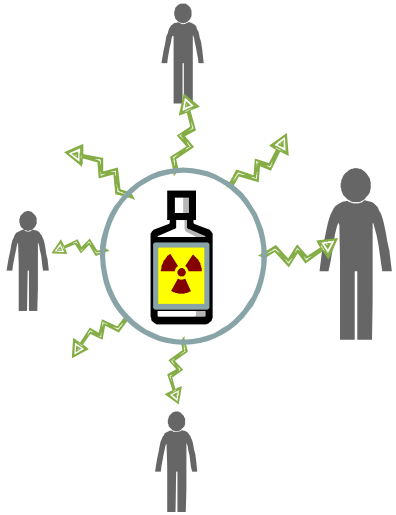
- 放射能で汚染された地域の状況
- 修復基準
- 修復の手順と修復オプション
- 修復計画の作成
- 今後の問題点

平常時の状況と事故後の修復における留意事項

修復 = 線源の除去＋被ばく経路の管理　による被ばくの低減
修復対象地域：公衆が共存する場合と作業者のみの場合



作業者と公衆の構成員を防護するための、線量限度と線量拘束値及び参考レベル（ICRP Publication 103 (2007)）

線量限度（被ばく経路の管理）	拘束値と参考レベル（線源の管理）
個々の作業者の職業被ばくからの防護と、代表的個人の公衆被ばくからの防護	
 遮蔽 距離 時間	 隔離 閉じ込め
計画被ばく状況における すべての規制された線源からの被ばく	すべての被ばく状況における ある線源からの被ばく

被ばく状況のタイプ	職業被ばく	公衆被ばく	医療被ばく
計画被ばく	線量限度 線量拘束値	線量限度 線量拘束値	診断参考レベル （線量拘束値）
緊急時被ばく	参考レベル	参考レベル	―
現存被ばく	―	参考レベル	―

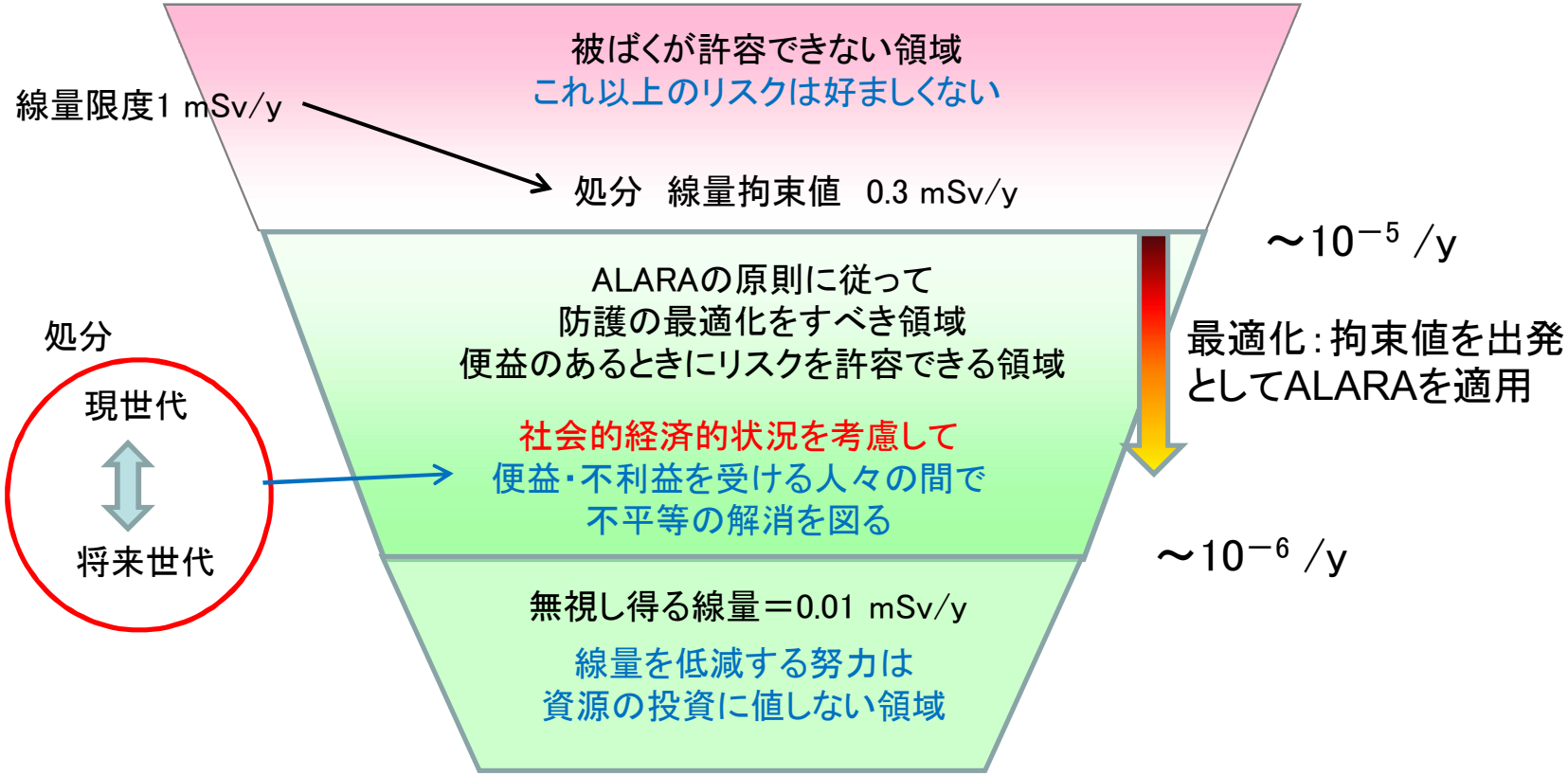
線量限度と線量拘束値及び参考レベル（ICRP Publication 103（2007））

拘束値と参考レベルのバンド[a)]（mSv）	被ばく状況の特徴	放射線防護の要件	例
公衆：緊急時被ばく状況 20より大きく 100まで[b, c)]	制御できない線源により、あるいは線量を低減するための対策が不釣り合いに混乱しているような状況により被ばくした個人。 **被ばくは通常、被ばく経路における対策によって制御される。**	線量を低減するための考慮がなされるべきである。線量が100mSvに近づく場合、それを下げるために一層の努力がなされるべきである。 個人は放射線リスク及び線量を下げる対策について情報を知らされるべきである。 個人線量の評価が行われるべきである。	放射線緊急事態による最も高い計画残存線量に対して設定された参考レベル
公衆：現存被ばく状況 1より大きく 20まで	個人は通常、必ずしも被ばくそれ自体ではなく、被ばく状況から便益を受けるべきであろう。 **被ばくは、線源若しくは被ばく経路における対策によって制御されることがある。**	可能ならば、個人がその線量を低減できるように十分な、一般的情報が入手できるべきである。 計画被ばく状況においては、個人の被ばく評価及び訓練が行われるべきである。	計画被ばく状況における職業被ばくに対して設定された拘束値 放射性医薬品による治療を受けた患者の介助者と介護者に対して設定された拘束値 住居のラドンによる高い計画残存線量に対する参考レベル
公衆：計画被ばく状況 1以下	個人は、個人にとってほとんど又は全く便益はないが、社会一般にとって便益がある線源に被ばくする。 **被ばくは**通常、事前に放射線防護要件が計画されている**線源に対して直接とられる措置により制御される。**	被ばくレベルに関する一般的な情報が利用できるべきである。 被ばくレベルに関する被ばく経路の定期的な検査が行われるべきである。	計画被ばく状況における公衆被ばくに対して設定された拘束値

a. 急性若しくは年間の線量
b. 例外的状況においては、情報を知らされた志願作業者が人命救助、放射線誘発による重篤な健康影響の防止、又は破滅的な状態への発展の防止のために、このバンドを超えた線量を受けることがある。
c. 関連する臓器・組織の確定的影響の線量しきい値を超える可能性がある状況では、常に対策を必要とするべきである。

線量拘束値＝防護の最適化のための出発点

線量でなく、線量を与える線源・行為を拘束している



- 行為の正当化：放射線による損害＜便益
- 防護の最適化：被ばくは合理的にできる限り低く
- 線量限度：ある個人が受ける被ばく線量の制限

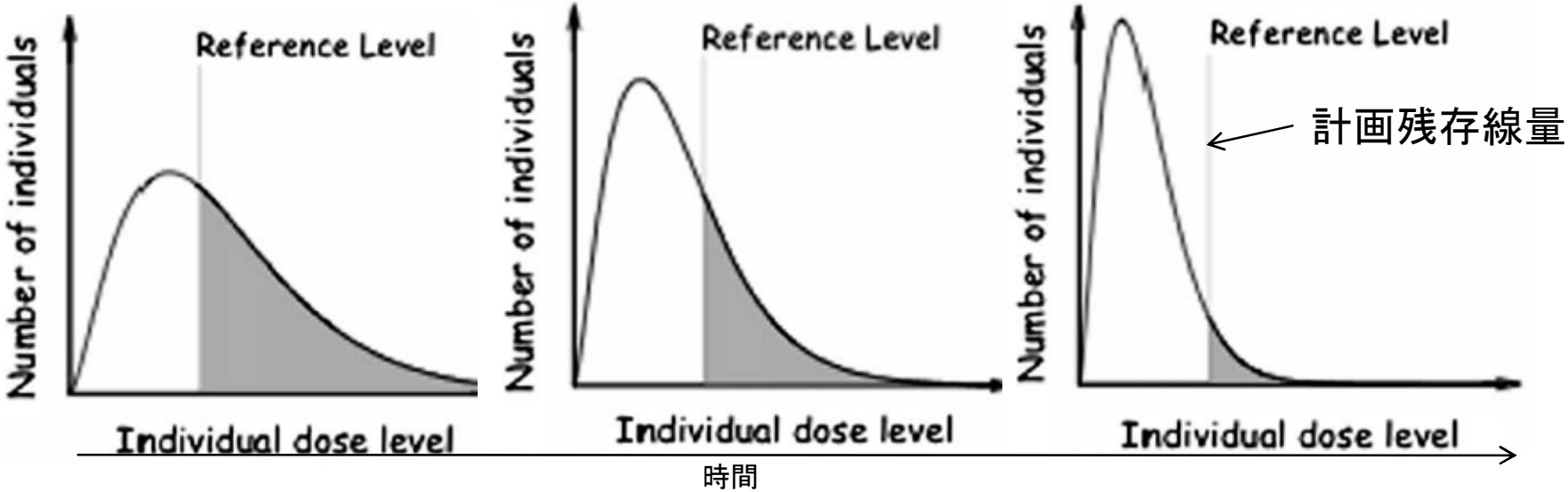
修復規準の設定：現存被ばく状況における参考レベルの適用

被ばく経路の管理と線源の除去

- 参考レベルの設定
- 最適化された防護措置の実施
- 防護への利害関係者の関与（自助努力）
- モニタリングと健康監視
- 汚染物品の管理

ICRP Publication 111「原子力事故又は放射線緊急事態後における長期汚染地域に居住する人々の防護に対する委員会勧告の適用」

現存被ばく状況状況にとっての長期目標は、「通常と見なせる状況に近い、又はそれと同等のレベルまで被ばくを低下させること」（ICRP、Publ.103、288項）であることから、委員会は、汚染地域内に居住する人々の防護の最適化のための参考レベルは、この被ばく状況区分に対処するためにPubl.103（ICRP、2007）で勧告された1～20mSvの範囲の下方部分から選定すべきであることを勧告する。過去の経験により、長期の事故後状況における最適化プロセスを制約するために用いられる代表的な値は1mSv/年であることが示されている（付属書A参照）。国の当局は現地の一般的状況を考慮に入れ、また状況を漸進的に改善するために中間的な参考レベルを採用するよう全体の復興プログラムのタイミングをうまく使ってもよい。



最適化プロセスの段階的実施による個人線量分布の経時変化（ICRP Publication 111）

個人線量は、平均的個人を使わない。現実的被ばく線量を推定する。
（緊急状況、計画状況（処分、クリアランスなど）では保守的設定による代表的個人）

影響を受けた廃棄物の処理処分に対する考え方（原子力安全委員会）

1. 再利用

事故の影響を受けた廃棄物は再利用が好ましい。

再利用する際には、市場に流通する前にクリアランスレベル*の設定に用いた基準（10 μSv/y）以下になるように、放射性物質の濃度が適切に管理されていること。(* Cs-137 0.1 kBq/kg)

2. 処理・輸送・保管

処理等に伴い周辺住民の受ける線量が1 mSv/yを超えないこと。また、処理施設等の周辺環境の改善措置により周辺住民の被ばくを抑制すること。

処理等に伴う作業者の受ける線量についても、可能な限り1 mSv/y を超えないことが望ましいが、高い放射能濃度の廃棄物が発生するときは、「電離放射線障害防止規則（昭和47.9.30労働省令第41号）」を遵守すること。

排気、排水等は「実用発電炉用原子炉の設置、運転に関する規則の規定に求める線量限度等を定める告示（平成13.3.21経産省告示第187号）」等で示された濃度限度を下回ること。

3. 処分について

放射能のレベル等に応じ、第二種廃棄物埋設（トレンチ、ピット、余裕深度処分）の適切な処分方法を選択し、処分施設の長期的な安全性について評価する。

基本シナリオ< 10 μSv/y, 変動シナリオ < 300 μSv/yを満足すること。

東京電力株式会社福島第一原子力発電所事故の影響を受けた廃棄物の処理処分等に関する安全確保の当面の考え方について(平成23.6.3安全委員会）

上下水処理等の脱水汚泥の取り扱い

1. 焼却・溶融処理

   焼却時に放射能濃度が継続して高い場合には、集塵装置の適切な能力の確保が必要

2. 保管

   < 10万Bq/kg（トレンチ処分の濃度上限値）の汚泥等は、住宅地等と適切な距離を保った上で、管理型処分場に仮置きができる。

3. 処分

   < 8千Bq/kg : 跡地を居住等に利用しない前提で、土壌層の設置、防水対策等の適切な対策を講じた埋め立て処分ができる（埋め立て作業者の安全も確保されるレベル）。

   8千Bq/kg ～ 10万Bq/kg：第二種廃棄物埋設の安全評価をして、埋立処分できる。

   管理型処分場の跡地の安全性が確保出来るまでの期間、モニタリングや施設の管理等、必要な措置を講じる（10万Bq/kgは浅地中トレンチ処分のCs-137の濃度上限値）。

4. 再利用

   他の原料との混合等を考慮し、市場に流通する前にクリアランスレベル以下になるものは利用可能

「放射性物質が検出された上下水処理等副次産物の当面の取り扱いに関する考え方」について（原子力災害対策本部：原子力安全・保安院、平成23.6.16）

災害廃棄物の広域処理の推進について

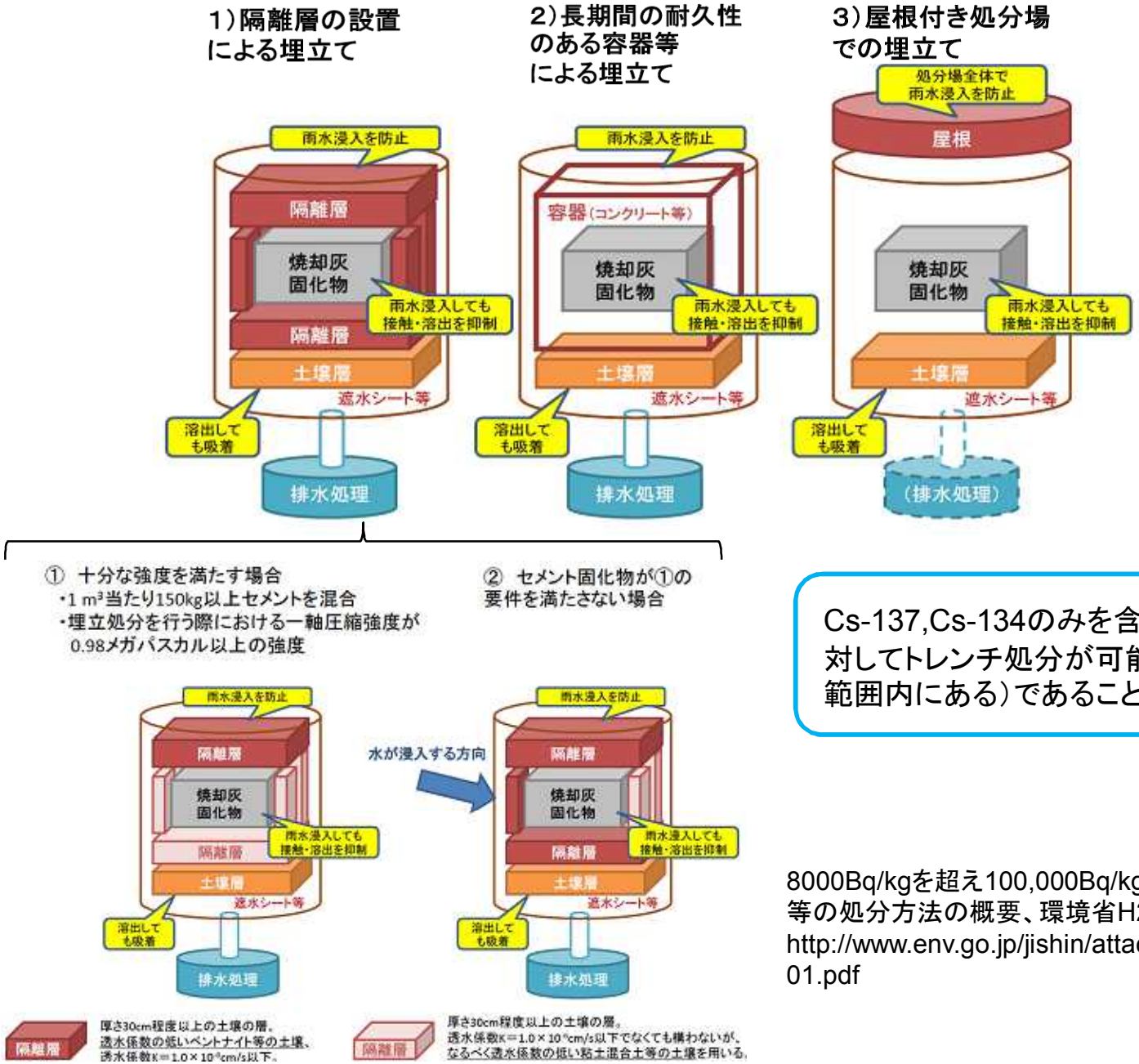
（東日本大震災により生じた災害廃棄物の広域処理の推進に係るガイドライン）平成23年8月11日環境省

- 木くず等の可燃物について、十分な能力を有する排ガス処理装置が設置されている施設で焼却処理が行われる場合には、安全に処理を行うことが可能である。
- 放射性セシウム濃度（セシウム134とセシウム137の合計値。以下同じ）が8,000Bq/kg以下である主灰は、一般廃棄物最終処分場（管理型最終処分場）における埋立処分を可能とする。ここで放射性セシウム濃度の目安8,000Bq/kgは、埋立作業者の安全も確保される濃度レベルである。
- 放射性セシウム濃度が8,000Bq/kgを超える場合は、埋立処分をするのではなく、埋め立てられた主灰中の放射性セシウム濃度の挙動を適切に把握し、国によって処分の安全性が確認されるまでの間、一時保管とすることが適当である。

↘

処分については後の技術的助言（次ページ）にて指示

8,000Bq/kgを超え100,000Bq/kg以下の焼却灰等の処分方法の概要
【一般廃棄物最終処分場（管理型最終処分場）での処理イメージ】以下のいずれか



Cs-137,Cs-134のみを含む廃棄物に対してトレンチ処分が可能（炉規法の範囲内にある）であることを示している

8000Bq/kgを超え100,000Bq/kg以下の焼却灰等の処分方法の概要、環境省H23.8.31
http://www.env.go.jp/jishin/attach/no110831001.pdf

福島環境汚染の状況と修復見通しについて

- 放射能で汚染された地域の状況
- 修復基準
- 修復の手順と修復オプション
- 修復計画の作成
- 今後の問題点

事故後の修復状況における特徴

汚染環境には大量の、クリアランス基準や放出基準を満たさない汚染物が存在する

↓

処分、クリアランス、放出では、規準を満足する必要がある。（住民に義務が生じる）
（さもなければ、全ての環境が汚染状況になってしまう）

- クリアランス(再利用)：10 μSv/yを超える線源が出回らないこと
  （Cs-137： 0.1 kBq/kg）
- 処分：基本シナリオ <10 μSv/y、変動シナリオ <300 μSv/y
- 放出（気体、液体）：出口で < 1 mSv/y、自然の希釈分散を見込む

↓

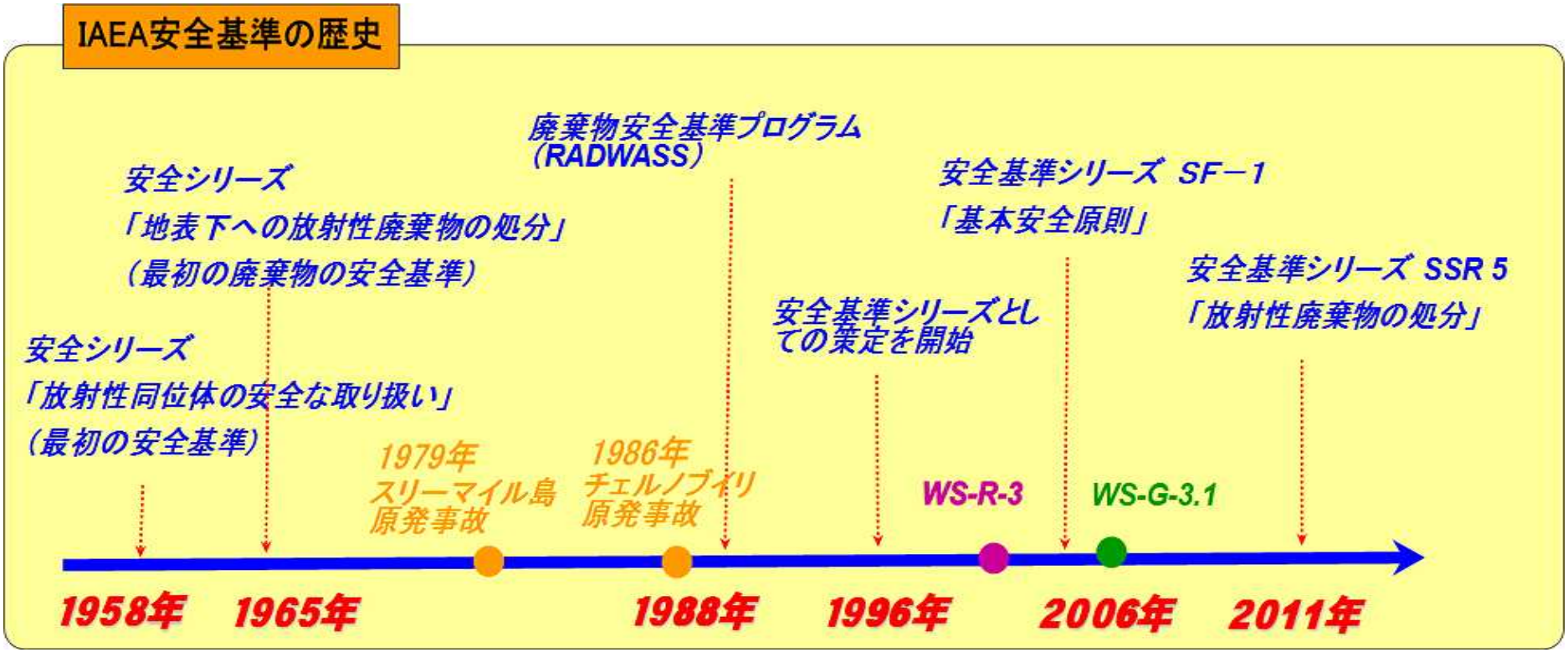
放射能で薄く汚染された大量の物質の処理処分が必要

↓

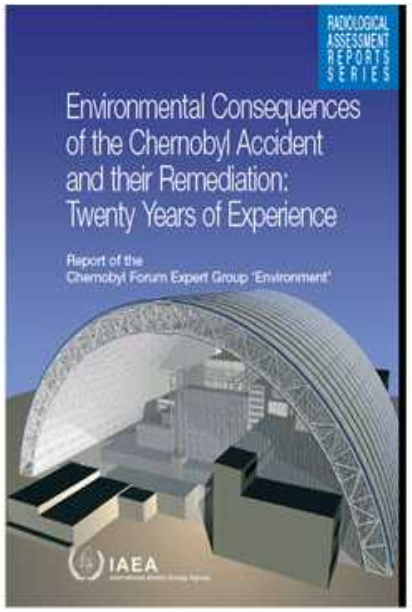
- 影響を受けた面積が非常に大きい⇒大量の廃棄物が発生する（処分地が必要）
- 意思決定に利害関係者との協議が必要（利害関係者の参加が必要）
- 資源（資金や人材）の大幅な投入が必要（多くの省庁の横断的協力が必要）
- 既存の法的枠組みを超える部分がある

修復活動に関するIAEA安全基準文書

修復に係る安全要件と安全指針が揃ったのは、チェルノブイリ事故から暫く経ってから。



修復に関連するIAEAの文書（主要な物）



「チェルノブイリ事故の環境影響とその修復」
STI/Pub/1239

WS-R-3「過去の活動および事故により汚染された地域の修復」

WS-G-3.1「過去の活動および事故により影響を受けた地域の修復プロセス」

TECDOC-1086「放射能汚染サイトの修復の技術」

安 全 基 準

関連するIAEA文書

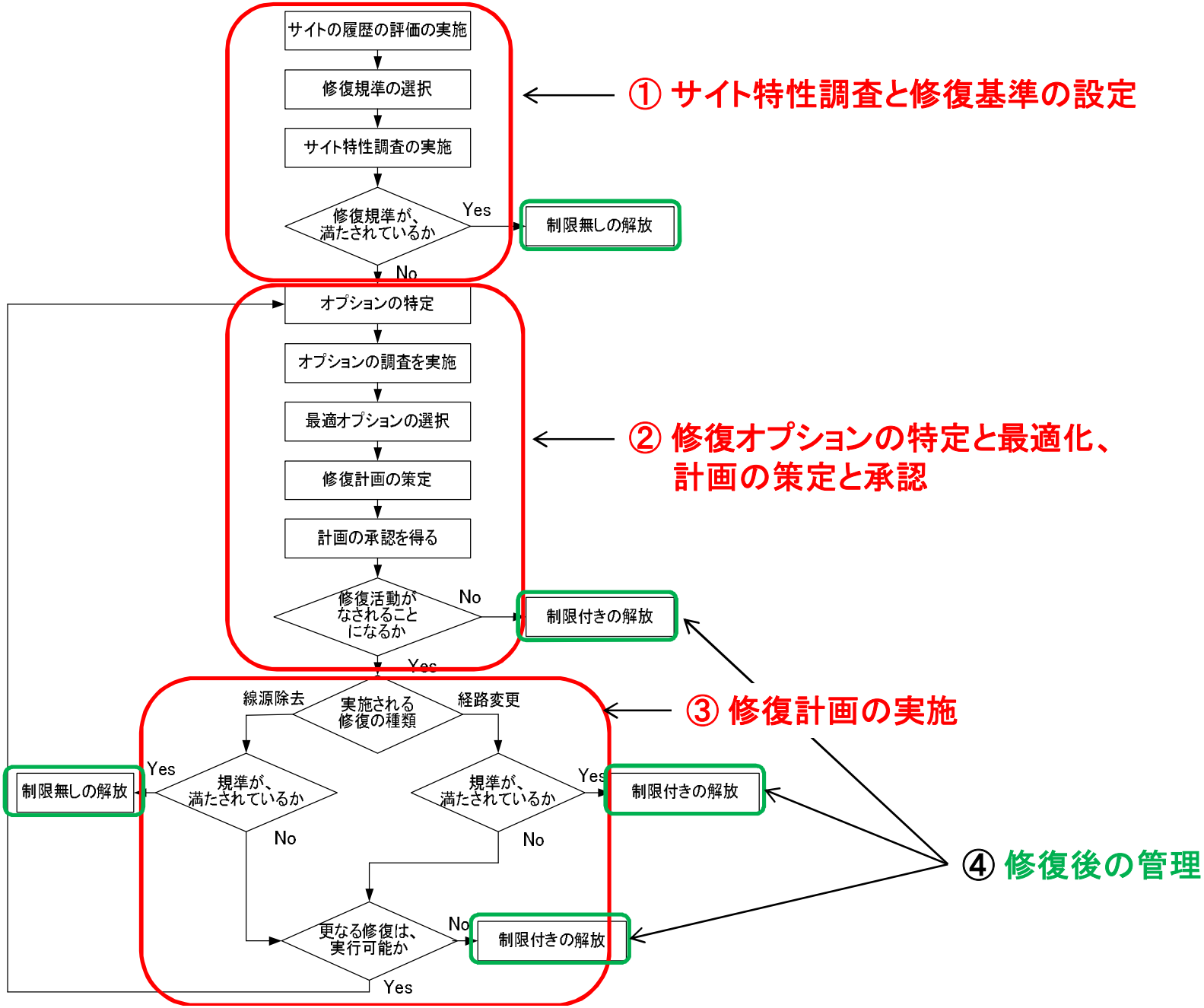
TECDOC-987 Application of Radiation Protection Principles to the Cleanup of Contaminated Areas (1998)
TECDOC-1017 Characterization of Radioactively Contaminated Sites for Remediation Purposes (1998)
TECDOC-1032 Factors for Formulating a Strategy for Environmental Restoration (1998)
TECDOC-1131 Restoration of Environments Affected by Residues from Radiological Accidents: Approaches to Decision Making (2000)
TECDOC-1148 Site Characterization Techniques Used in Environmental Restoration Activities, Final Report of a co-ordinated research project 1995-1999 (2000)
TECDOC-1240 Present and Future Environmental Impact of the Chernobyl Accident (2001)
TECDOC-1279 Non-Technical Factors Impacting on the Decision Making Processes in Environmental Remediation (2002)
TRS-419 Extent of environmental contamination by Naturally Occurring Radioactive Material (NORM) and technological options for mitigation (2003)

WS-R-3(安全要件)とWS-G-3.1(安全指針)には過去の経験に基づき、修復において国、規制機関のなすべき責任と行うべき修復の指針を述べている

- 汚染の可能性のある地域の特定と定量化およびその責任機関の明確化
- 汚染地域の優先付け
- 修復規準の規定
- 修復活動が、開始されるべき時期の特定
- 汚染サイトに伴う修復活動の実績に関係して、選定された最適化された修復戦略、修復計画書および、補助資料の放射線学的安全、非放射線学的安全および一般安全の観点からのレビューと承認
- 実施中の修復活動のモニタリング
- 地域の規制上の管理の終了に先立つ、すべての最終状態の適合性の検証
- 地域の規制上の管理の正式な終了
- 地域が制限された使用のために解放される場合には、その制限あるいは制度的管理のレビューと承認
- 修復プロセスに伴う全ての活動における公衆の参加の確保
- 同じ地域における非放射線学的危険性に対する責任を有する他の規制機関との連携

IAEA, WS-G-3.1：Remediation Process for Areas Affected by Past Activities and Accidents (2007)

修復プロセス(WS-G-3.1)



既存の修復オプション

1. 自然修復(介入なしオプション)

- 自然の収着・遅延、放射性崩壊
- 風化と微生物活動、表面流去、浮遊粉塵、生態系の物質循環
- サンプリングおよび移行のモデリングと評価
- 制度的管理(立入制限、土地利用制限、狩猟採集制限、物品の出荷制限)との組み合わせ

2. 原位置修復

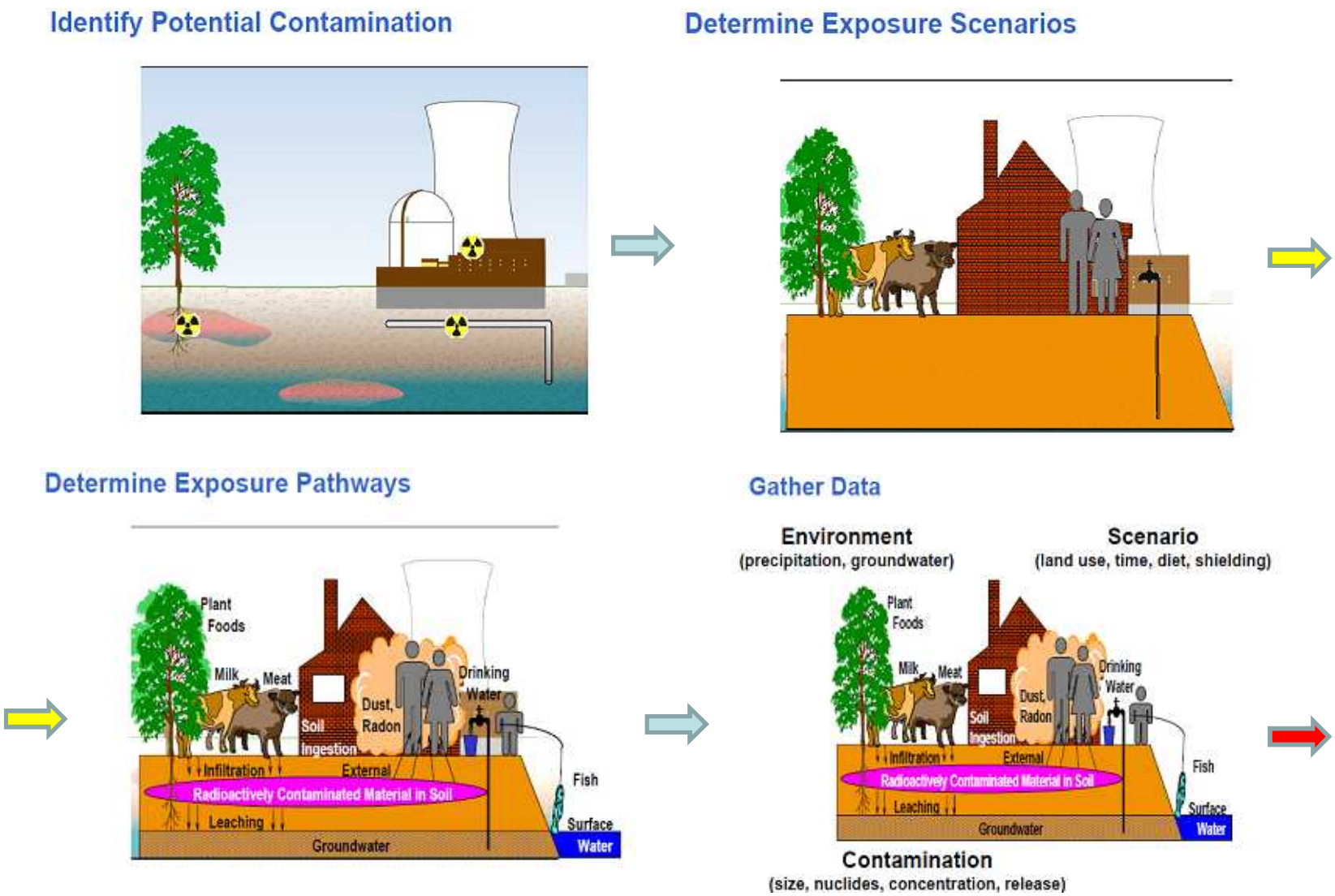
- 閉じ込め
  表面キャップ(覆土)(土壌／粘土、アスファルト／コンクリート、合成膜、表面密封剤)
  止水壁(ベントナイトスラリー、セメントグラウト、シートパイル、土壌凍結、生物学的バリア、合成膜)
  底部バリア(グラウト、乾燥(乾燥空気など)バリア、ライナー、ポリマーバリア)
  水圧制御(排水溝、排水路)
- 安定化
  原位置カプセル化、グラウト／ポリマー注入、土壌とのセメント混合、原位置締め固め
- 原位置処理
  生物学的処理(バイオレメディエーション):生物分解、バイオマスレメディエーション、植生促進
  物理／化学処理、熱処理
- **農業法**
  土壌逆転、植生回復、土壌添加剤、作物選択、動物生産法

3. 物質除去⇒廃棄物輸送、サイト外処理、処分

- 植生の除去
- 表面土壌の除去(掘削、遠隔掘削、粉塵制御)
- 硬いあるいは岩の多い表面からの除去(機械ブラッシング、アブレーシブジェット、ウォータージェット、スカリファイヤー(土掻き機))
- 土壌洗浄、地下水処理

IAEA TECDOC-1086: Technologies for remediation of radioactively contaminated sites (1999)

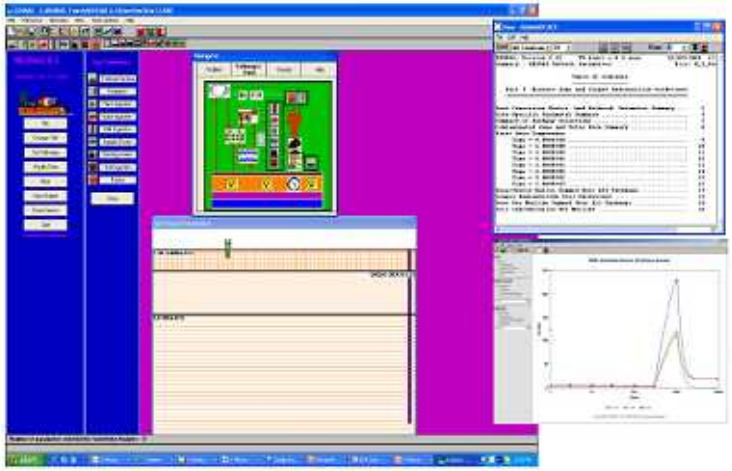
サイト特性調査と修復規準の設定



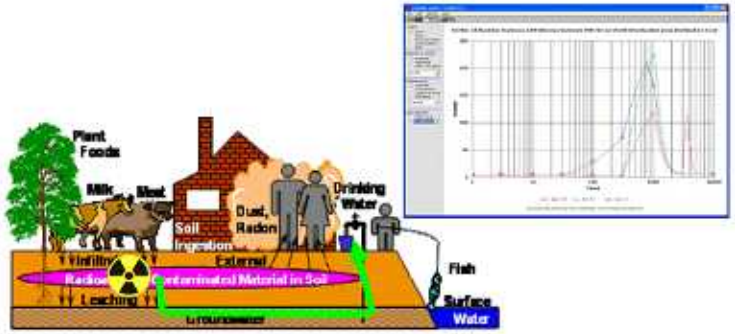
IAEA, Network of Environmental Management and Remediation – ENVIRONET: Presentations from the Training Meeting on Environmental Remediation of Radiologically Contaminate Sites and The New IAEA‘s Initiative, Chicago-IL, USA (7-11 June, 2010). (ANL, RESRAD code used in DOE, NRC, EPA)

サイト特性調査と修復規準の設定

Perform Calculations

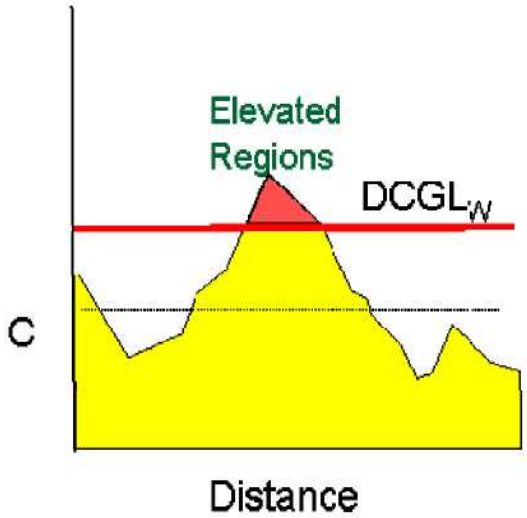


Understand Calculations

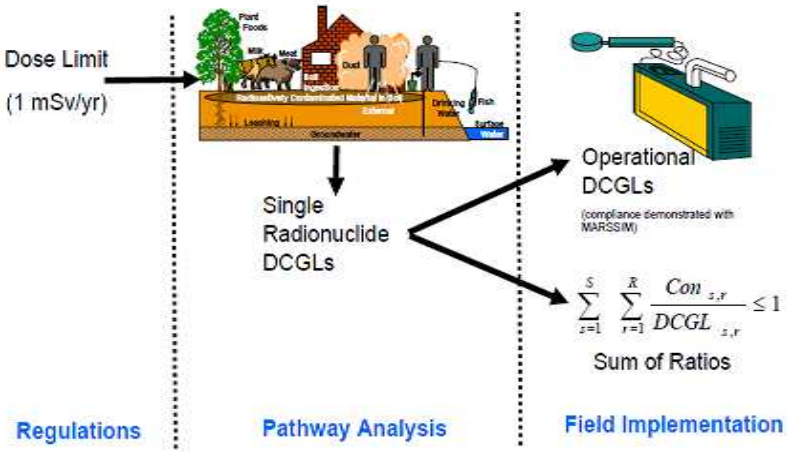


簡単に測定できる
実用値を導出
（WS-G-3.1）

Calculate Cleanup Guidelines



Generate Operational Guidelines



DCGL = Derived Concentration Guideline Level
(“backward” calculation”)

Cleanup

被ばくの評価、被ばく経路(被ばくシナリオ）の設定の基本項目

Radiological Risk Assessment and Environmental Analysis,
J. E. Till, H. A. Grogan (eds.) Oxford University Press(2008)

1. 放射線学的リスク評価プロセス
2. 放出放射性核種量評価
3. 放射性核種の大気輸送
4. 放射性核種の表層水輸送
5. 放射性核種の地下水輸送
6. 地圏食物連鎖移行経路：概念とモデル
7. 水圏食物連鎖移行経路
8. サイト概念暴露経路
9. 内部被ばく線量評価
10. 外部被ばく線量評価
11. 評価モデルにおける不確実性評価と適用
12. 電離放射線による被ばくリスク
13. 被ばくリスク評価における疫学の役割：基礎と応用
14. モデルの実証
15. 環境中の放射性核種の規制

チェルノブイリ事故後の環境修復の経験

（1） 市街地

汚染物： 芝地、公園、街路、道路、街区、建物（屋根、屋上、壁）、高木・低木

- 初期に、雨、風、人間活動（交通、清掃）による表面汚染のかなりの低減
- 下水汚泥等への二次汚染
- 現在（2006）までに空間線量率は事故前の状態に復帰

対策：市街地における表面汚染の除染係数

	技術	除染係数
窓	洗浄	10
壁	砂吹き	10−100
屋根	放水／砂吹き	1−100
庭	掘り起こし	6
庭	表土除去	4−10
樹木	刈り込み／撤去	～10
街路	真空清掃	1−50
街路（アスファルト）	ライニング	>100

IAEA STI/PUB/1239: Environmental Consequences of the Chernobyl Accident and their remediation: Twenty Years of Experience (2006)

チェルノブイリ事故後の環境修復の経験

（2） 農耕環境

- 土壌、植物表面への沈着⇒植物の根からの取り込み⇒動植物への移行
- 動植物への移行、風化、放射性崩壊、土壌下方への移行
  初期の数年に大きく減少⇒その後は減少率が減少⇒ 3–7 % / 年
- 長期には、^{137}Cs の肉とミルクへの移行、野菜への移行（より程度低）

対策：農耕環境における汚染の低減係数

	低減係数		低減係数
通常の工作（最初の年）	2.5 – 4.0	飼料作物の変更	3 – 9
すくい取りと埋設による耕作	8 – 16	クリーンフィーディング	2 – 5
石灰散布	1.5 – 3.0	セシウム結合剤の投与 （プルシアンブルー）	2 – 5 （時間依存性あり）
無機質肥料	1.5 – 3.0	原乳のバターへの加工	4 – 6
有機質肥料	1.5 – 2.0	菜種から油への加工	250
根元改良		表面改良	
初回	1.5 – 9.0	初回	2.0– 3.0
二回目以降	2.0 – 3.0	二回目以降	1.5– 2.0

表層土壌の除去⇒コスト高、肥沃度の破壊、汚染土壌の埋設の課題もある

IAEA STI/PUB/1239: Environmental Consequences of the Chernobyl Accident and their remediation: Twenty Years of Experience (2006)

チェルノブイリ事故後の環境修復の経験

（3） 森林環境

- 樹木（葉や樹皮）に沈着⇒生態系による再循環により系内に滞留
- 現在も高いレベルにとどまっている
- 対策：
  立入制限、
  伐採での汚染部除去、狩猟採集の制限、燃料としての利用制限
  火災予防、病害保護等

（4） 水系環境

- 土壌、懸濁粒子等への吸着、希釈、減衰により初期に急減
  ⇒長期には土壌からの溶出により支配される
- 魚類への分布⇒初期に取り込み⇒急減⇒食物連鎖により濃縮
- 対策：
  汚染された水と魚類の摂取制限以外によい方法がない

森林や水系環境は、自然修復に頼るしかよい方法がない

IAEA STI/PUB/1239: Environmental Consequences of the Chernobyl Accident and their remediation: Twenty Years of Experience (2006)

農林水産省による、農地土壌の除染技術の開発

その他の実証試験：反転耕（天地返し）（水田）（本宮市）

農林水産省プレスリリース「農地土壌の放射性物質除去技術（除染技術）について」平成23年9月14日
http://www.s.affrc.go.jp/docs/press/110914.htm

農地土壌除染技術適用の考え方

当面、5,000 Bq/kg以上の農地をそれ未満に下げることを目標とする（水田:6,300 ha、畑：2,000 haと推計）
注）●は廃棄土壌がでる手法、〇は出ない手法

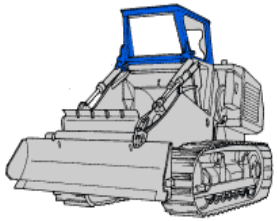
<table>
<tr><th>土壌中セシウム濃度</th><th colspan="2">畑</th><th colspan="2">水田</th></tr>
<tr><td>< 5,000 Bq/kg</td><td colspan="4">農作物への移行を可能な限り低減する観点、また、空間線量率を下げる観点から、必要に応じて〇反転耕、〇移行低減栽培技術を適用。</td></tr>
<tr><td rowspan="2">5,000 ～ 10,000 Bq/kg</td><td colspan="2">地下水位</td><td colspan="2">土壌診断・地下水位</td></tr>
<tr><td>低い場合
●表土削り取り
〇反転耕</td><td>高い場合
●表土削り取り</td><td>低地土
●表土削り取り
●水による土壌撹拌・除去
〇反転耕（耕盤が壊れる）</td><td>低地土以外
●表土削り取り
●水による土壌撹拌・除去（低地土より効果低）
〇反転耕（耕盤が壊れる）（地下水位が低い場合のみ適用）</td></tr>
<tr><td>10,000～25,000 Bq/kg</td><td colspan="2">●表土削り取り</td><td colspan="2">●表土削り取り</td></tr>
<tr><td>> 25,000 Bq/kg</td><td colspan="2">●表土削り取り
5 cm 以上の厚さ*で削りとり。
ただし、高線量下での作業技術の検討が必要。
（例えば土ぼこりの飛散防止のための固化剤の使用）</td><td colspan="2">●表土削り取り
5 cm 以上の厚さ*で削りとり。
ただし、高線量下での作業技術の検討が必要。
（例えば土ぼこりの飛散防止のための固化剤の使用</td></tr>
</table>

* 表土を薄く削ると、廃棄土壌の放射性セシウム濃度が100,000 Bq/kg（トレンチ埋設濃度上限値）を超える可能性があるため。

農林水産省プレスリリース「農地土壌の放射性物質除去技術（除染技術）について」平成23年9月14日
http://www.s.affrc.go.jp/docs/press/110914.htm

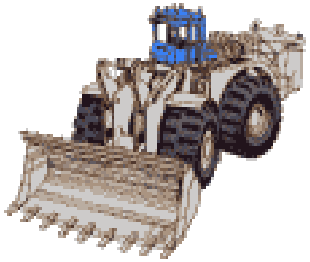
表土除去（掘削、積載、運搬）、路面清掃に用い得る市販の土工機械の例

ブルドーザー



スクレープドーザー

スクレーパー



ローダー

モーターグレーダー

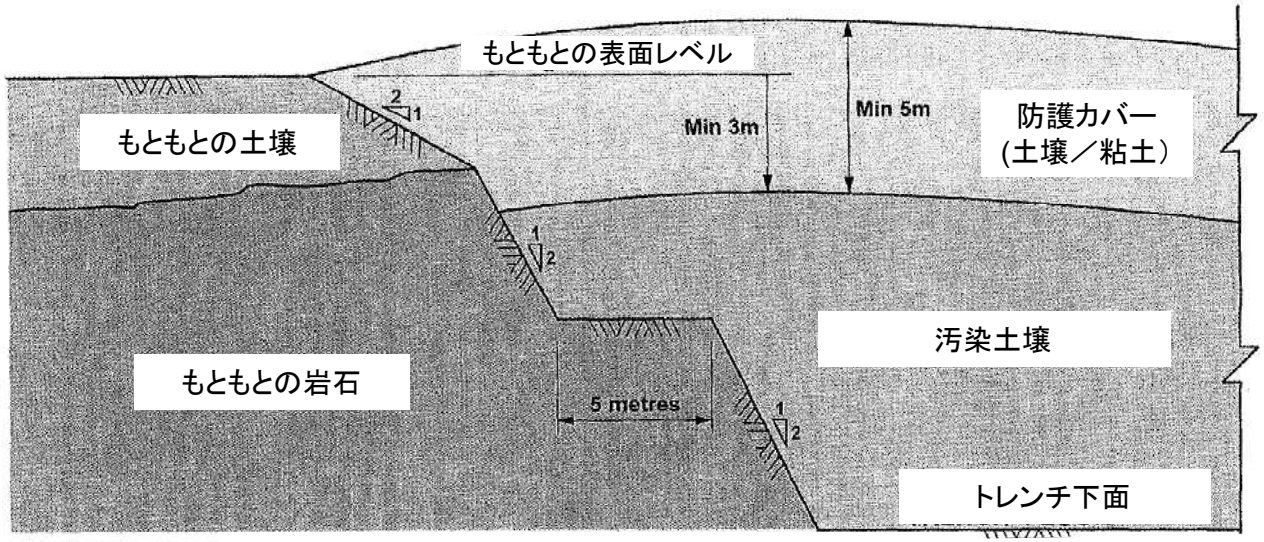
８トン積み4輪ブラシ式路面清掃車
（豊和工業KK）

配慮事項
- 運転員の被ばく低減
- 土壌による汚染防止
- 作業中の汚染の拡散防止
- 運搬（現位置、処分地）時の汚染防止

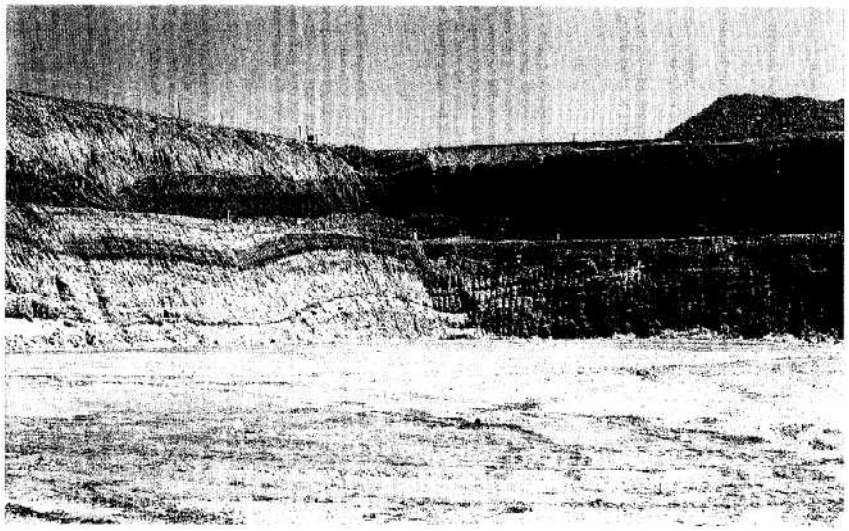
→ 大量の処分すべき汚染土壌が発生
処分地が遠隔なら運搬費莫大

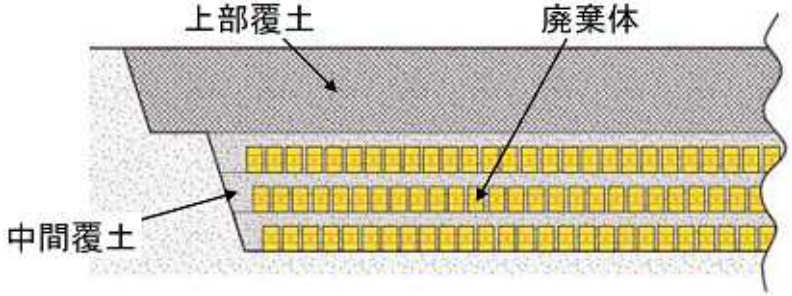
山﨑建設株式会社土工教室より
http://hw001.spaaqs.ne.jp/geomover/equip/equip.htm

トレンチ（埋め立て）埋設



典型的な埋設トレンチの断面図



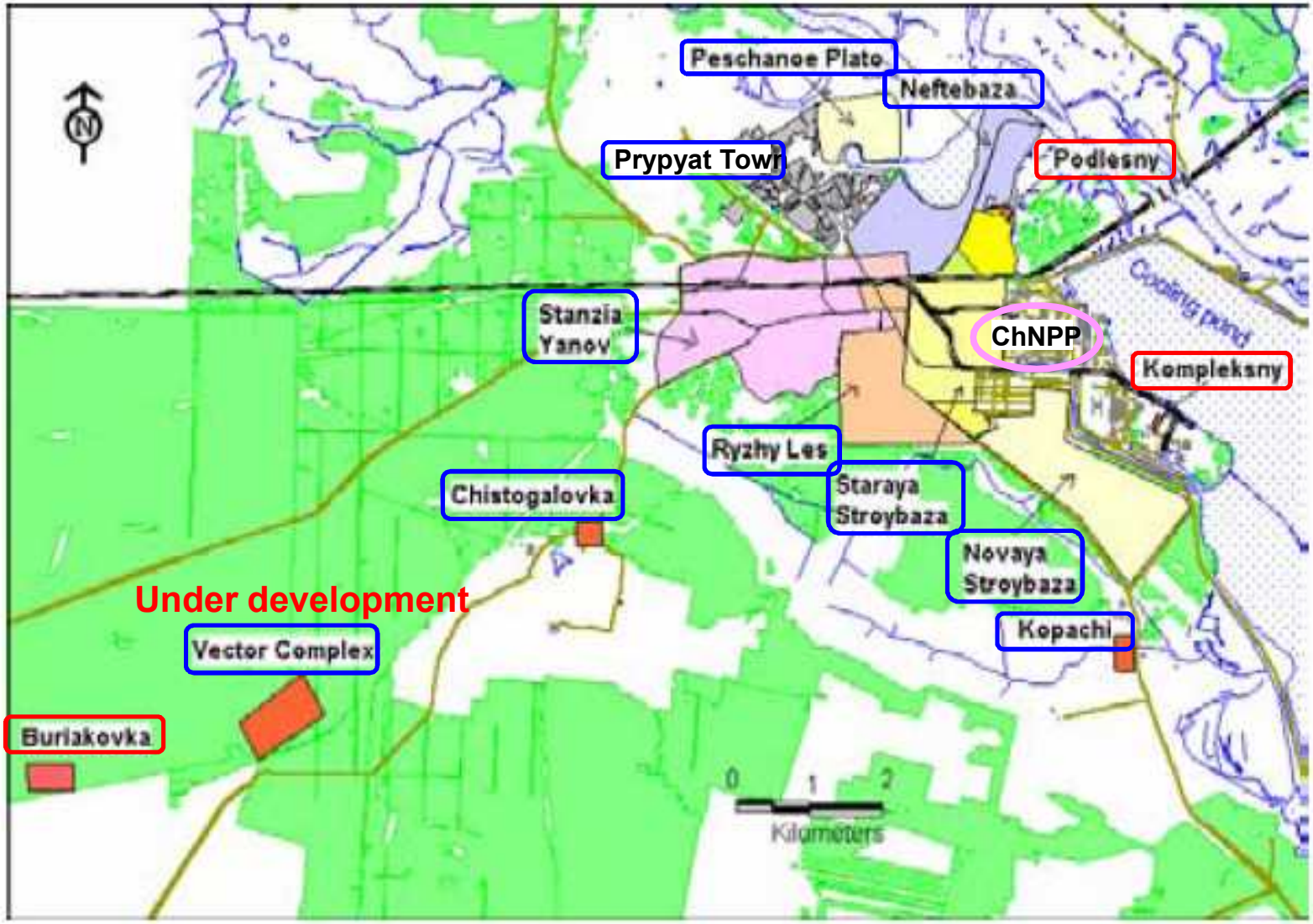


より工学的な埋設トレンチ断面図

Taranaki（オーストラリア、マラリンガ核実験サイト）の埋設トレンチ（Geosafe Australia)

IAEA TECDOC-1086: Technologies for remediation of radioactively contaminated sites (1999)

Chernobyl事故からの廃棄物の管理 (STI/PUB/1239)



サイト内からの廃棄物 ⇒ 放射性廃棄物処分施設(規制下)

サイト外からの廃棄物(> 555 kBq/m^2 の地域のみ)⇒ 放射性廃棄物暫定貯蔵施設(容器なし、人工バリアなしでの浅地中トレンチまたは地表での集積)

シェルター内の放射性物質インベントリ(STI/PUB/1239)

	Type of radioactive waste and criteria of assessment	Category of radioactive waste	Amount
FCM	Fresh fuel assemblies, spent fuel assemblies, lava type material, fuel fragments, radioactive dust	High level	About 190–200 t, 700 t of graphite
Solid radioactive waste with less than 1% nuclear fuel (mass)	Fragment of the core with a dose rate at 10 cm of more than 10 mSv/h		
Liquid radioactive waste	Changing inventory based on precipitation (e.g. pulp, oils, suspensions with soluble uranium salts)	Low level (up to 3.7×10^5 Bq/L)	2500–5000 m^3
		Intermediate level (more than 3.7×10^5 Bq/L)	500–1000 m^3
Solid radioactive waste	Metal equipment and building material, for example concrete, dust, non-metal material (organic, plastic)	High level	38 000 m^3 (building material), 22 240 t (metal constructions)
		Low and intermediate level	300 000 m^3 (building material and dust), 5000 m^3 (non-metal)

放射性廃棄物暫定貯蔵施設の状況(STI/PUB/1239)

	Size (ha)	Number of trenches	Number of landfills	Radioactive waste type	Radioactive waste volume (10^3 m^3)	Total activity (Bq)
Sites with well known inventories						
Neftebaza	53	221	4	Soil, plants, metal, concrete and bricks	104	4×10^{13}
Peschannoe Plato	78	2	82	Short lived[a] low and intermediate level waste of soil, rubble and concrete	57	7×10^{12}
Partially investigated sites						
Stantzia Yanov	128	Known: more than 36	—	Soil, plants, metal, concrete and bricks	30	$>4 \times 10^{13}$
Ryzhy Les	227	Estimated at more than 61	Estimated at more than 8	Mainly soil, some construction and domestic material	500	Up to 4×10^{14}
Staraya Stroibaza	130	More than 100	—	Soil, metal, concrete and wood	171	1×10^{15}
Novaya Stroibaza	122	—	—	Soil, plants, metal, concrete and bricks	150	2×10^{14}
Pripyat	70	—	—	Contaminated vehicles, machinery, wood and construction waste	16	3×10^{13} Bq (1990)
Chistogalovka	6	—	—	Material from demolition of buildings, soil, wood and work clothes	160	4×10^{12}
Kopachi	125	—	—	Construction waste from demolition	110	3×10^{13}

参考：例えば10,000 km^2(see p.7)×5 cm = 5×10^8 m^3 となる

福島環境汚染の状況と修復見通しについて

- 放射能で汚染された地域の状況
- 修復基準
- 修復の手順と修復オプション
- 修復計画の作成
- 今後の問題点

事故により影響を受けた地域の修復のポイント

- ◆ 規制機関の責任、修復の責任機関のなすべき事項
- ◆ 修復の基本戦略の策定（正当化、最適化、資金確保等を含む）
- ◆ 利害関係者の関与
- ◆ 修復レベル、修復前後の土地利用等の制限の設定
- ◆ 廃棄物の管理施設／処分施設の確保
- ◆ 修復、廃棄物の処理・処分・輸送の作業者と公衆の安全
- ◆ 人と環境のモニタリング
- ◆ マネジメントシステム【品質保証】（記録の保存、教育訓練）

→ **事業として計画的に進める必要がある。**

IAEA安全基準には、世界各国で得られた経験や教訓が反映されており、原子力に係る様々な活動を行う上での良好事例が示されている。

国内の汚染された地域の修復活動を行う際には、これらの安全基準文書に従うことが重要となる。今後、我が国の経験がIAEA安全基準に反映されることになり、そのための検討が現在進められつつある。また、ICRP Publication 111も有益であり、IAEA安全基準に反映されると見られる。

IAEA安全基準を積極的に活用し、これらを国内の修復プログラムに取り込むことが望まれる。

放射性物質汚染対処特措法*（2011.8.30公布）の概要

* 平成23年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震に伴う原子力発電所の事故により放出された放射性物質による環境の汚染への対処に関する特別措置法

責　務

○国：原子力政策を推進してきたことに伴う社会的責任に鑑み、必要な措置を実施
○地方公共団体：国の施策への協力を通じて、適切な役割を果たす
○関係原子力事業者：誠意をもって必要な措置を実施するとともに、国又は地方公共団体の施策に協力

制　度

基本方針の策定

環境大臣は、放射性物質による環境の汚染への対処に関する基本方針の案を策定し、閣議の決定を求める

基準の設定

環境大臣は、放射性物質により汚染された廃棄物及び土壌等の処理に関する基準を設定

監視・測定の実施

国は、環境の汚染の状況を把握するための統一的な監視及び測定の体制を速やかに整備し、実施

放射性物質により汚染された廃棄物の処理

放射性物質により汚染された土壌等（草木、工作物等を含む）の除染等の措置等

特定廃棄物又は除去土壌（汚染廃棄物等）の処理等の推進

国は、地方公共団体の協力を得て、汚染廃棄物等の処理のために必要な施設の整備その他の放射性物質に汚染された廃棄物の処理及び除染等の措置等を適正に推進するために必要な措置を実施

費用の負担

○国は、汚染への対処に関する施策を推進するために必要な費用についての財政上の措置等を実施
○本法の措置は原子力損害賠償法による損害に係るものとして、関係原子力事業者の負担の下に実施
○国は、社会的責任に鑑み、地方公共団体等が講ずる本法に基づく措置の費用の支払いが関係原子力事業者により円滑に行われるよう、必要な措置を実施

環境省第1回環境回復検討会資料3-1（H23.9.14)より http://www.env.go.jp/jishin/index.html

除染に関する緊急実施基本方針（平成23年8月26日原子力災害対策本部）

緊急時被ばく状況（追加線量 >20 mSv/y：3.7μSv/h）にある地域

- 計画的避難区域、警戒区域
- 段階的かつ迅速に縮小
- 県及び市町村と連携の上、国が除染を実施
  希望するときは市町村自らが計画作成、実施可能(安全確保前提)

現存被ばく状況（追加線量 1~20 mSv/y：0.23−3.7μSv/h）にある地域

- 県及び市町村が除染を計画作成、実施
- 線量の高低に応じ、面的または局所的除染

（検討事項）

- ✓ 目標設定
- ✓ 除染対象毎の方針及び方法の決定
- ✓ 実施主体
- ✓ 仮置場の確保

現存被ばく状況（追加線量 <1 mSv/y）にある地域

- 面的除染は不要
- 県及び市町村が局所的除染

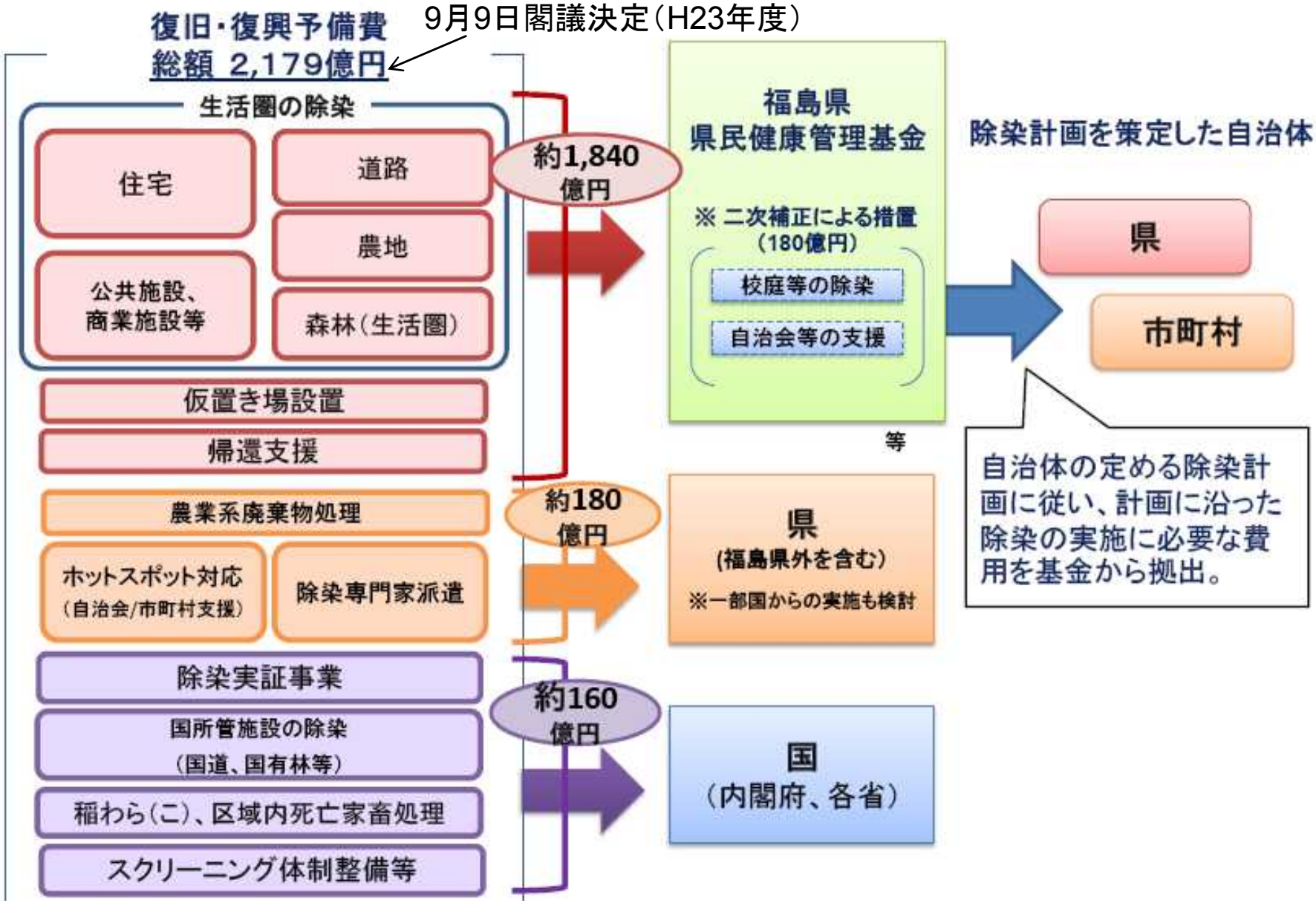
いずれについても

除染実施における暫定目標

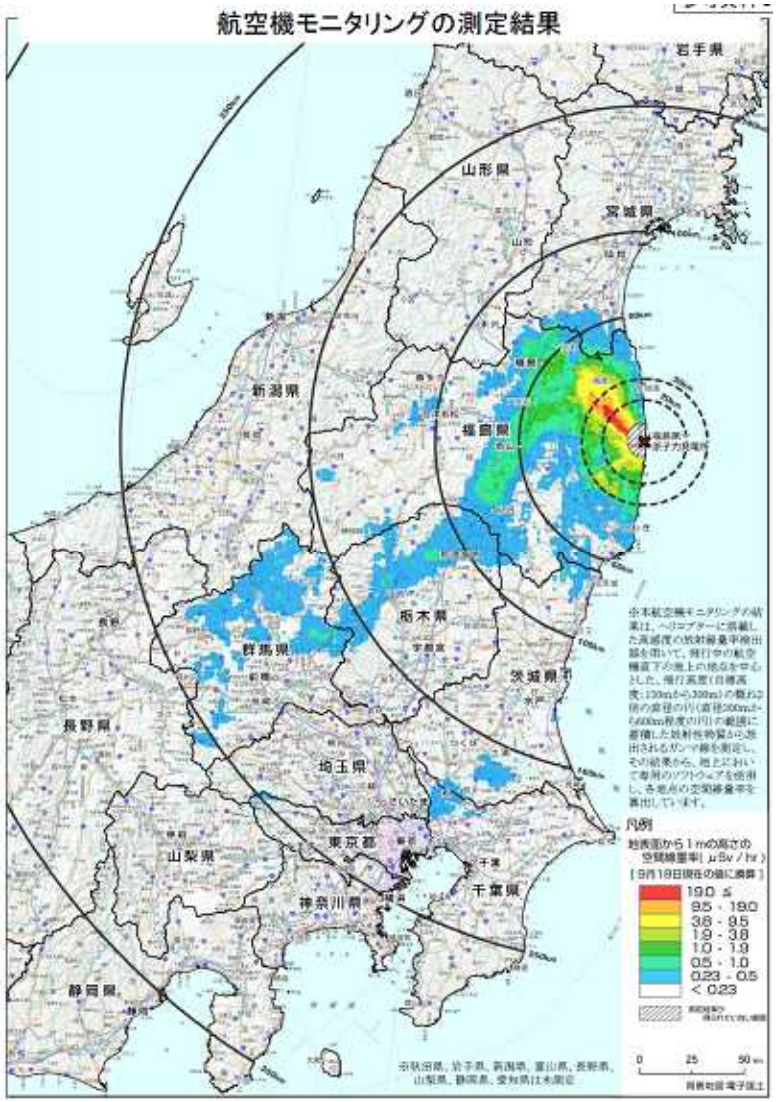
- 物理的減衰と風雨などの自然要因による減衰（ウェザリング効果）で約40%減少が見込まれる
- 2年後までに年間被ばく線量を50%減少、子供の推定年間被ばく線量を約60%削減

環境省環境回復検討会第1回資料4-1（H23.9.14）
環境省災害廃棄物安全評価検討会・環境回復検討会第1回合同検討会（H23.101.10)資料2,参考資料2,3

予備費による事業の全体イメージ



修復対象地域の特定と優先付け



国が除染を実施する地域
（>20 mSv/y(3.7 μSv/h)）

$3.7 \times 10^{-3} \times (8+0.4 \times 16) \times 365 = 19.4$

県及び市町村が計画作成・実施する地域
（1 mSv/y(0.23 μSv/h)～20 mSv/y）

$(0.23-0.04) \times 10^{-3} \times (8+0.4 \times 16) \times 365 = 1$

修復計画の作成(WS-G-3.1)

- 修復活動の正当化と最適化:この2原則の適用に当たり、利益/不利益(回避線量、放射線・非放射線リスク、環境影響、作業者のリスク、経済的費用、経済状態の改善、二次廃棄物の発生、一部の利害関係者の懸念の増大・低減、社会的混乱)を考慮すべき。
- 修復計画:モニタリング要件の策定、修復の目的達成のための意思決定(修復活動のスケジュールと手順、実用量過去、修復活動の終了規準、地域への立ち入りまたは、使用に関する修復後の条件)、教訓の活用、廃棄物の流れ(廃棄物流)が特定されるべき。廃棄物の量と種類が検討されるべき。
- 放射線サーベイ:サーベイの種類と頻度は修復計画で検討すべき。
- 線量評価:放射線モニタリングプログラムからの情報と現実的シナリオを用い、線量を見積もるべき。
- 安全評価・環境評価:放射線・非放射線リスクの評価、作業者・公衆・環境の安全確保に向けた防護対策の詳述。
- 資金確保:十分な資金確保の仕組み。責任機関は、利害関係者と協力して規制機関が開始する強制措置の前に、自発的、協力的な活動を起こすよう交渉すべき。

IAEA, WS-G-3.1:Remediation Process for Areas Affected by Past Activities and Accidents (2007)

修復の運営面(WS-G-3.1)

- 職員(Staff)の教育訓練:修復活動の責任機関は、有能な職員を持つべき。職員に対して、作業者の安全確保のため、管理、監督、教育訓練は、適切なレベルで行うべき。
- 組織と運営上の管理:修復プログラムの情報は、全ての利害関係者に提供
- 修復中の放射線防護:修復作業が、汚染地域/その近傍の一般公衆に被ばくを引き起こすようであれば、行為(計画被ばく状況)に対して適用される公衆の放射線防護の管理をすべき。環境の影響も避けるべき。
- 修復中のサイト内外のモニタリング:修復活動中のモニタリング(サイト内外)
- 廃棄物管理:様々な廃棄物が出される。処分前管理・輸送・処分を含む。
- 緊急時計画立案:修復中に生じうる不測の事態の対処
- セキュリティ
- 品質保証:修復と廃棄物管理について、良く訓練された個人が承認された手順で行うべき。記録の管理。
- 要件順守の確保:規制機関は、責任機関が修復規準を正しく選択し、適用していることを確認すべき。要件順守も検証すべき。不確実性の定量化。

IAEA, WS-G-3.1:Remediation Process for Areas Affected by Past Activities and Accidents (2007)

福島環境汚染の状況と修復見通しについて

- 放射能で汚染された地域の状況
- 修復基準
- 修復の手順と修復オプション
- 修復計画の作成
- 今後の問題点

チェルノブイリで経験された修復過程での問題

トップダウンアプローチ

crisis of confidence

- 初期（緊急事態対応）には効果をあげた。
- 後には問題が生じた。
  - ✓ 食品、物品の品質に対する懸念
  - ✓ 汚染の存在とその健康に及ぼす影響に関する懸念
  - ✓ 専門家、当局に対する信頼の失墜
- 公衆は、日常生活の統制に自信を失い、自暴自棄に
- 古典的なトップダウンで縦割りの行政アプローチは、現場の複雑な状況に対処しきれず破たん

修復：除染による放射線安全の復旧から生活の質（Quality of Life)の回復へ

ボトムアップアプローチ：ETHOS（OECD), CORE(UN, World Bank)

- 各村からそれぞれの懸念、優先すべき事項を聞き取り、学習
- 懸念に応えるための個々の現実的計画に関する作業グループの設立
- 地域の放射線学的状況に関する、放射線測定、医療、教育、農業、家庭に関する専門家の育成と再編成
- 食品の品質と住民の防護の改良に必要な活動の認定
- 地域の専門家、当局及び必要なら国の当局の支持のもと、活動実施

A Report by the Committee on Radiation Protection and Public Health (CRPPH), Stakeholders and Radiological Protection: Lessons from Chernobyl 20 Years After, OECD/NEA (2006).

ETHOS project

1996～1998：欧州連合の後援のもと

- Stolyn地区Olmany 村（ベラルーシの南、チェルノブイリから約200 km）で実施
- 約100人（10代の若者、若い母親、農業家、教師、森林労働者など）を集め、
- 各人の関心（食肉、ミルク、子供の放射線防護など）に応じて6つの作業グループを作り活動

↓

- ミルクの品質の顕著な改善
- 若い子供の内部被ばくを約1/3に低減
- 村のミルク、食肉市場の再設
- 民間農場主によるジャガイモの生産技術試験に成功

↓

2000～2001：後援者を増やして

- Stolyn地区（人口9万人）の4つの村で
- Belarus Institute の支援のもと地域の専門家、当局が同様の計画を推進できるよう知識を伝達

援助を待つ受け身の立場から、自助努力に能動的に関与し、持続的自立へ

↓

CORE (Cooperation for Rehabilitation) programme in Chernobyl Areas
(United Nations, World Bank の後援のもと、より大々的に実施）