

福島原発環境除染総合戦略プランの考察

大西康夫^{*1}

ここで提案した福島環境除染戦略プランは科学的に除染を総括して決定し、各々の汚染場所での除染作業を決定するものである。このプランは全体の汚染域を覆う次の5種類の分布図を作ることでその目的を達成する：(i) 環境分布図、(ii) 放射性物質流動パラメーター分布図、(iii) 放射性物質移行分布図、(iv) 環境除染詳細分布図、(v) 環境除染優先度詳細分布図。チェルノービル原発事故と米国ハンフォード地での環境除染を例としてここにあげる。

Keywords: 福島原発事故、環境除染、除染プラン、放射性物質、チェルノービル、ハンフォード地

The proposed Fukushima environmental remediation strategic plan is to provide a scientifically-valid clean-up decision making and to implement specific remediation activities at given contaminated locations. The remediation plan consists of development of the following five distribution maps covering the entire contaminated area; (i) environmental parameter distribution map, (ii) radionuclide transport parameter map, (iii) radionuclide migration and fate rate map, (iv) remediation distribution map and (v) remediation priority map. Examples of environmental remediation of Chernobyl Nuclear accident and the U.S. Hanford Site are also presented here.

Keywords: Fukushima nuclear accident, environmental remediation, decontamination plan, radionuclides, Chernobyl, Hanford Site

1 はじめに

マグニチュード9の東日本大震災とそれに伴う津波は東日本に大被害を与えた、25,000もの尊い命が失われた。その災害が福島第一原発のメルトダウンの事故を引き起こし、主に¹³¹I、¹³⁴Csと¹³⁷Csを環境中に放出した。この論文は福島原発環境除染総合戦略プランを提案し、汚染された環境の除染について幾つかの過去の汚染と除染の例を挙げて考察した。この論文の目的は、除染対策を科学的根拠によって決定し、実行する総合的、かつ詳細に各々の汚染場所での除染を行う方法を述べることである。

2 環境除染総合戦略プラン

2.1 放射性物質の汚染経路

福島原発から大気中と太平洋に放出された放射性物質は主に¹³¹I、¹³⁴Csと¹³⁷Csである[1]。¹³¹Iの半減期は8日なので、現在時点（2011年12月）では、環境中に放出された¹³¹Iは殆ど消滅している。また、⁸⁹Sr、⁹⁰Sr、²³⁸Puと^{239/240}Puも福島原発から環境中に検出されたが、それらの濃度はバックグラウンドの濃度に比べて低いので、¹³⁴Csと¹³⁷Csでの環境除染が主体となると考えられる[2]。ただしここで述べる環境除染総合戦略プランは、とくにセシウムに限定していない。

Fig. 1とFig. 2は原発から環境に放出された放射性物質の環境での移行と人体への汚染経路を示す。

これらの図に示すように、人体への被ばく量を減らすには環境中の放射性物質の濃度を減らすこととその汚染経路を取り除くか、または縮小する必要がある。汚染経路を取り除く為には放射性物質の環境中での移行を調べる必要があり、次のことを行う必要がある。

- 環境モニタリング
- 実験

Environmental remediation strategic planning of Fukushima Nuclear Accident by Yasuo ONISHI (yasuo.onishi@pnml.gov)

本稿は、日本原子力学会バックエンド部会第27回夏期セミナーにおける講演内容に加筆したものである。

*1 Pacific Northwest National Laboratory, and Washington State University
P.O. Box 999, Richland WA. 99352, U.S.A.
(Received and accepted 26 October 2011)

● 評価アセスメント

- 大雑把に全体を把握し、重要な場所、現象、特定の人達等の選択をする為の簡略化したアセスメント
 - 簡単な方法と簡略化されたモデルを使う
 - 選別された重要な場所等での詳細アセスメント
 - 綿密な方法と詳細なコンピューターモデルを使う。
- 除染対策を決定した後では下に記載されている要項を行う。
- 詳細現地調査
 - 詳細実験
 - 除染作業
 - 除染作業の前、最中、後の詳細アセスメント。

2.2 環境除染総合戦略プラン

Fig. 1とFig. 2に示したように、環境除染対策にはさまざまな要素が考慮される。それを科学的に総括的、かつ詳細に決定するプランとして次の環境除染総合戦略プランが考えられる。このプランは、Fig. 3に示すように、ウェブ上で次の5つの詳細な環境対策分布図を作成し、地元の人達の参加で除染決定をする方法である：

- 分布図1：環境分布図
 - 分布図2：放射性物質流動パラメーター分布図
 - 分布図3：放射性物質移行分布図
 - 分布図4：環境除染詳細分布図
 - 分布図5：環境除染優先度詳細分布図。
- これらの5つの分布図はその一つ一つは、また幾つかの分布図がお互いに層になって構成される。分布図1：環境分布図は現在の汚染状態を把握し、除染対策決定の要素にする。この分布図は次の5つの分布図で構成されている。
- 放射性濃度分布図（Fig. 4はその例）
 - 人口分布
 - 地形（山、平野、川、用水路等）
 - 土地使用用途（農地、酪農地、学校、病院、老人センター、道路、公園等）

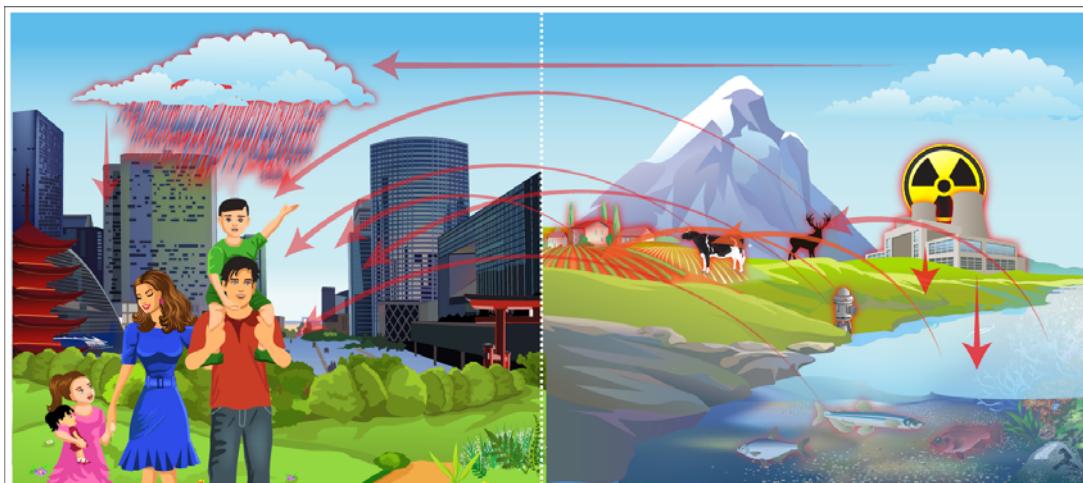


Fig. 1 Radionuclide environmental pathways

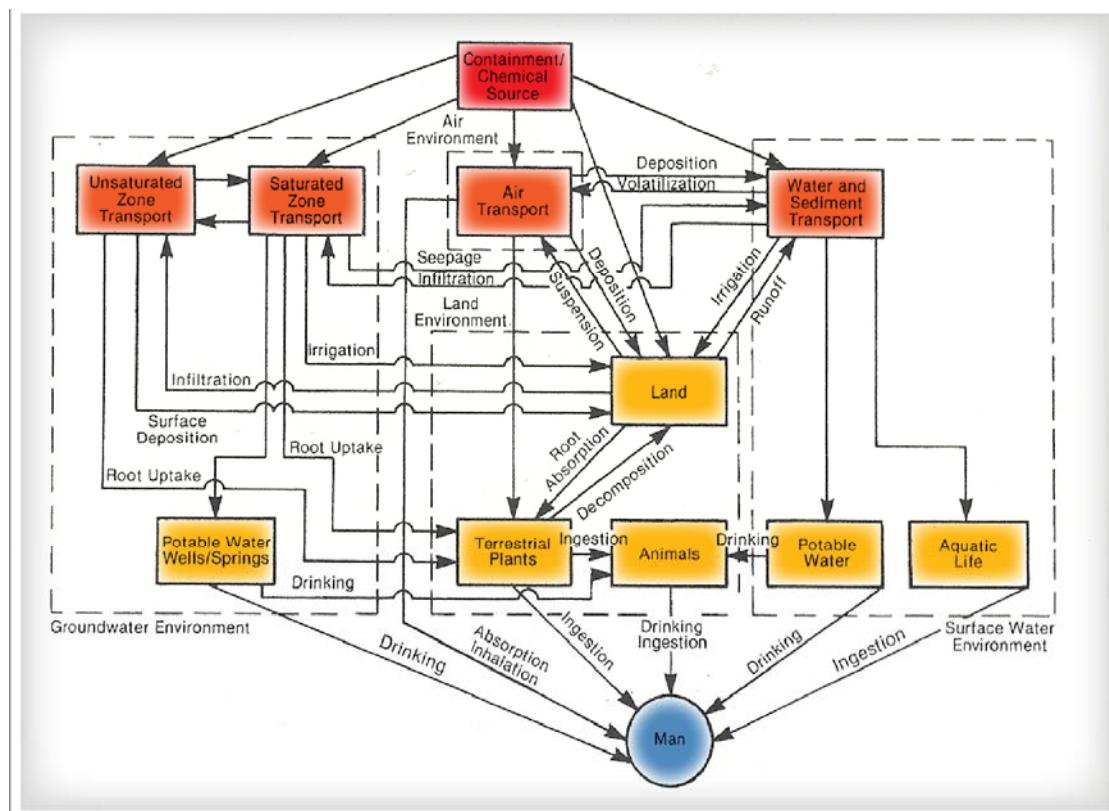


Fig. 2 Radionuclide pathways to man

- 土地表層と地質（草地、林、アスファルト、砂地、粘土等）。

分布図2と3は、放射性物質の将来の移行と溜まる場所を予測し、除染決定の要素とする。分布図2は放射能物質流動パラメターの分布を、分布図3は流動量分布を示す。

分布図2：放射能物質流動パラメターフィールド分布図は下記の項目で構成されている。

- 気候（雨、雪、気温等）
- 地表上での放射性物質流動性
 - 土地勾配
 - 土の侵食度
- 地下水中での放射性物質流動性
 - 間隙比

- 透水係数等

分布図3：放射性物質移行分布図は下記の分布図を¹³⁴Cs, ¹³⁷Csにつきそれぞれ作る

- 地表上での放射性物質移行度
 - 放射性物質の土壤への吸着性
 - 地表水（雨水、雪解け水）の流量
 - 土壤の侵食度
 - 地表上での移行度
- 地下水中での放射性物質移行度
 - 放射性物質の土壤への吸着性
 - 不飽和地下水中での移行度
 - 鮫和地下水中での移行度



Fig. 3 Web-based environmental remediation action planning

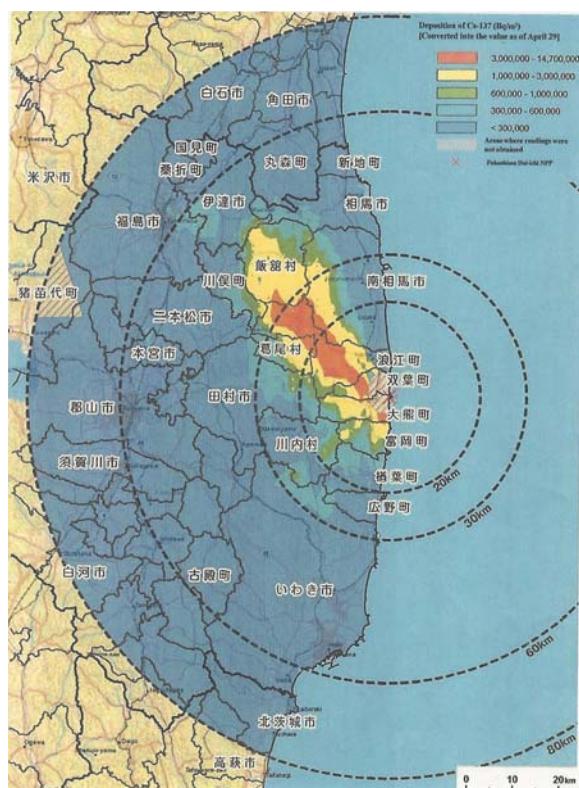


Fig. 4 ^{137}Cs distribution on the land surface [1]

分布図4は分布図1と3で明らかになった各汚染場所につき、適切な除染方法と必要かつ実行可能な除染量の分布図を作る。主なセシウムの除染方法はTable 1に示す。

分布図4は環境除染詳細分布図で次の要素で構成されている。

- 除染方法のリスト（掘削、濾過、セメント固化、地球化学処理、水処理等）
 - 土 (Table 1を参照)
 - 川水、農業用水と地下水
- 環境分布図1で示された各地での除染方法の選択
 - 除染範囲と除染分量
 - 除染技術の性能と成熟度
 - 除染から出た放射性物質の処理技術の性能と成熟度
 - 放射性物質処分技術の性能と成熟度

分布図5は環境除染総合戦略プランの総括で、この分布図で除染計画とその優先度を決定する。この分布図5は次の要素を考慮する：

- 環境と人体へのリスクアセスメント
 - 現在の状態
 - 将来の状態：放射性物質移行度とその変化
- 放射性物質処分地の確保の達成度
- 土地利用
- 社会的と費用の考量
- その他

除染アセスメントとして、分布図2と3で述べたように、除染に重要なことは現在の状態だけでなく、将来どう変わると予測して決定をする必要がある。それには、放射性物質の移行を知ることが大切である。主な放射性物質の移行と減滅の機構は次のような物である。

- 水と風の流れによる移行と拡散
- 土砂に吸着した放射性物質の移行
 - 移行
 - 沈殿
 - 再浮遊
- 吸着
- 放射性物質の崩壊
- 娘核種の生成
- 他の環境媒体からの放射性物質の導入。

Table 1 Main remediation technologies for soils contaminated by ^{137}Cs

技術	記述	備考
掘削	上層部の土を搔きとり、洗浄するか、廃棄する	新しい土か、洗浄された土と入れ替かえない限り表土の損失となる
隔離	人工的に覆う	隔離により汚染物の露出をさける
セメント固化	セメントの注入による固体化	汚染物を隔離する 将来の土地利用は制限される
現地での濾過	酸、イオン交換や錯化物（クエン酸等）による濾過	浅い土地に有効。過剰に使用された時は濾過水の回収が必要。制御できない汚染物移行が起こる危険性がある
放射能濃度等による物理的土壤選別	高い放射能濃度の土壤と低い濃度の土壤を選別	十分発展した技術 効果は地質による
現地外での土壤洗浄	水や抽出溶液で土壤洗浄してセシウムを抽出	効果は地質による

上で述べたような機構で、セシウムの濃度が時と場所において変化する。地表での雨水と雪解けの水による土砂の流出と下流での蓄積が重要で、セシウムが何所からどれだけ流出し、何所に幾ら溜まるかは人体へのリスクに直接影響を与えるので、除染作業決定の重大要素になる。また地下水中ではセシウムは地中の土壤に吸着され、水溶性の放射性物質に比べて著しく遅い速度で移行する[3]。Fig. 5 と Fig. 6 に示すように、分配係数、 K_d で表されたセシウムの吸着度は地質と水質によって変わるが、土砂に吸着する特性が一般に強い[4,5]。

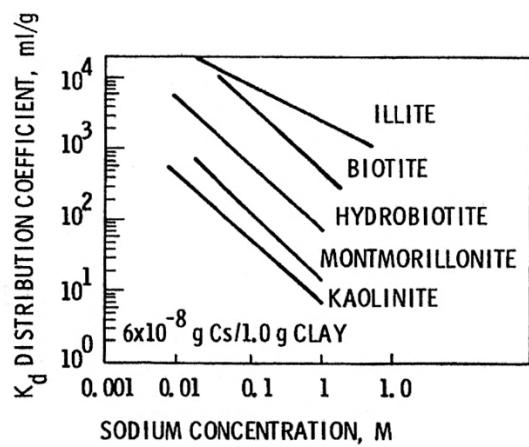


Fig. 5 Variation of ^{137}Cs distribution coefficients with soil characteristics [5]

2.3 簡略化したアセスメント

2.1 で述べたように、除染対策決定にはまず簡単な方法と簡略化されたモデルを使い、全体を把握する必要がある。セシウムは吸着性が高いと考えられるので、地表においては、土砂に吸着されたセシウムが雨水や雪解けの水で移行する過程を把握することが重要である[4,5]。そのひとつとして、式 1 で示される雨水で地表上で流れる土壤流失量を計算する Modified Universal Soil Loss Equation がある[6]。

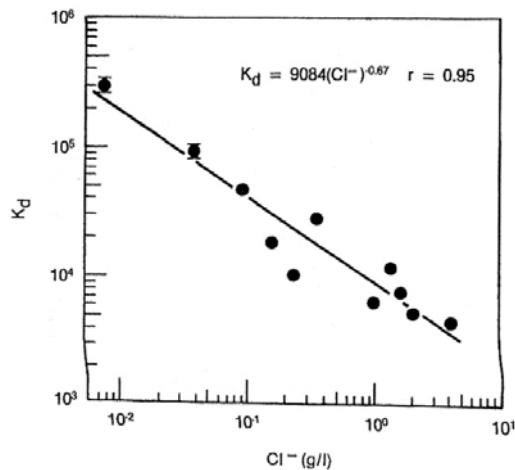


Fig. 6 Variation of ^{137}Cs distribution coefficients with soil characteristics [5]

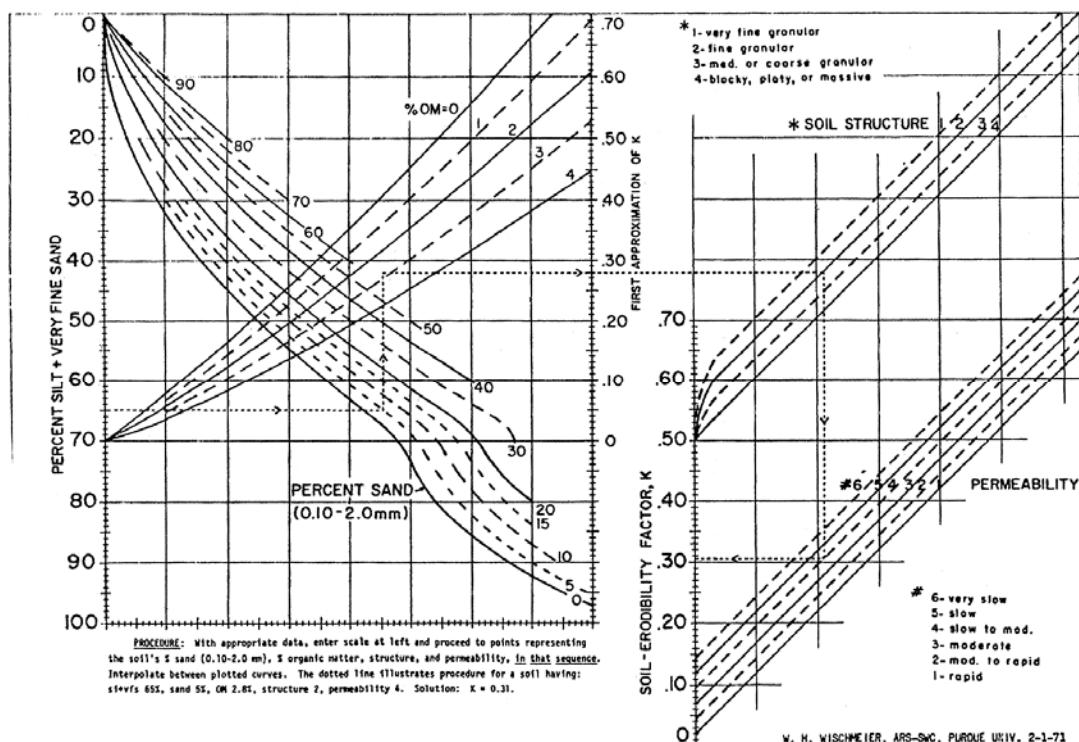


Fig. 7 Determination of soil erodibility factor K of the modified universal soil loss equation [7]

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P \quad (1)$$

- A* : Soil loss per unit area by runoff (例えば, tons/ha/given duration)
- R* : Rainfall/snowmelt-runoff erosion index as a measure of erosive force
- K* : Soil erodibility factor
- L* : Slope length factor
- S* : Slope steepness factor
- C* : Cover management factor for specified cover and management
- P* : Erosion control practice factor

この式 1 の右辺の 6 つの係数はすでに確立されている方法で決定できる[6]. 例えば、パラメータ, *K* は式 2, または Fig. 7 で与えられる.

$$K = 0.01 [2.1 \times 10^{-4} (12 - OM) M^{1.14} + 3.25(s-2) + 2.5(p-3)] \quad (2)$$

- M* : product of primary particle size fraction percent
- OM* : percent organic matter
- p* : permeability
- s* : classes of structure.

2.4 詳細な環境アセスメントと除染例

チェルノービル環境除染対策と米国ワシントン州に在るハンフォード地での環境除染対策の実例をここで示す.

2.4.1 チェルノービル環境除染対策

1986 年 4 月 26 日から 10 日間にかけて起こったチェルノービル原発事故で大量の放射性物質が空中に吹き上げられ、地表に沈殿して環境汚染が起こった. Fig. 8 はニーパー河流域における ^{137}Cs の地表での濃度分布を示す. この河の水はキエフ市の飲料水であり、また灌漑用水にも使われ 2,000 万人のウクライナ人がその汚染経路を通して内部被ばくを起こしている[7].

放射性物質の人への汚染経路を遮断した除染対策の場合をここで述べる. ニーパー河の支流であるプリピヤト河はチェルノービル原発のすぐ横を通っており、その洪水領域はチェルノービル原発事故で、 3×10^{14} Bq の ^{90}Sr の核燃料粒が沈殿した (Fig. 9 と Fig. 10).

4 年に一度の確率で起こる洪水の FETRA モデルによるシミュレーションを Fig. 11 に示す[7]. この図にあるように、この洪水は非常に汚染された洪水領域を覆い、 ^{90}Sr を河に運んでくる. しかし河沿いに堤防を作り、洪水領域への洪水を阻止することにより、同じ洪水が起こっても ^{90}Sr の濃度は半分に減った. Fig. 12 で示された FETRA モデルでの予測は実測でも証明されている. この堤防の建設により、ニーパー河によるウクライナ人への被ばくを減らした.

現在のチェルノービル原発を Fig. 13 に示す. チェルノービル原発が壊れても放射性物質が環境中に放出されないように、100 年は耐久する New Safe Confinement (Fig. 14) の建設が開始された.

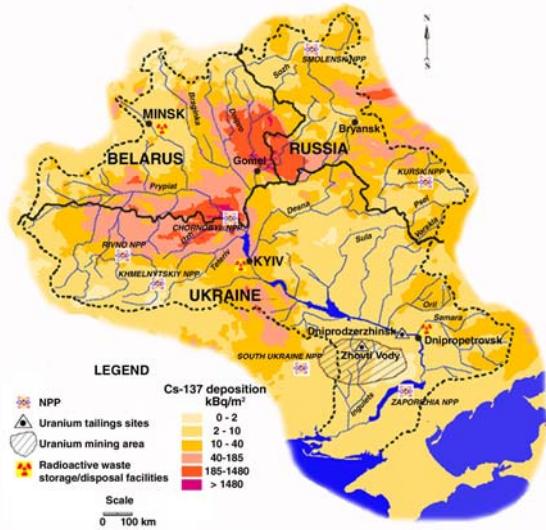


Fig. 8 ^{137}Cs released from Chernobyl Nuclear Power Plant in the Dnieper River Basin



Fig. 9 Chernobyl Nuclear Plant and The Pripyat River Floodplain

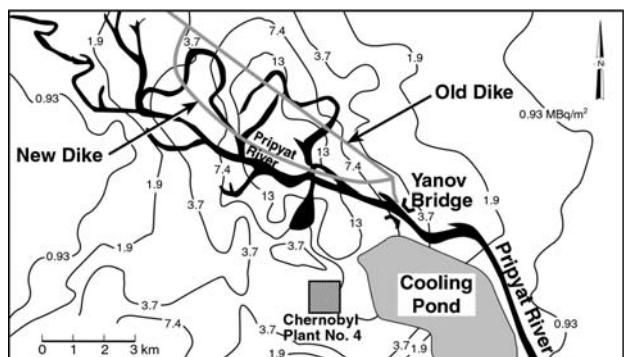


Fig. 10 ^{90}Sr distribution in the Pripyat River Flood plain near the Chernobyl Nuclear Power Plant

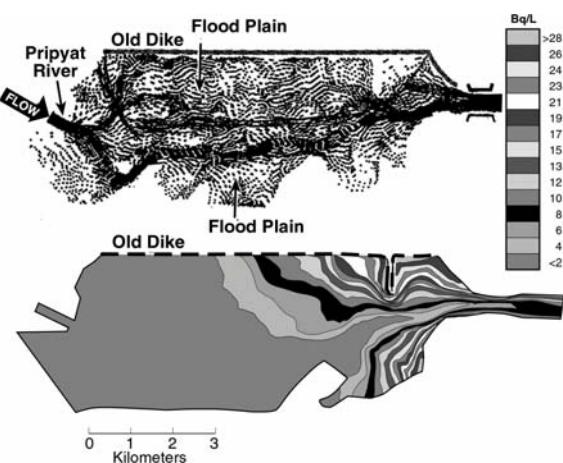


Fig. 11 Predicted flow and ^{90}Sr concentrations in the Pripyat River without the New East Bank Dike

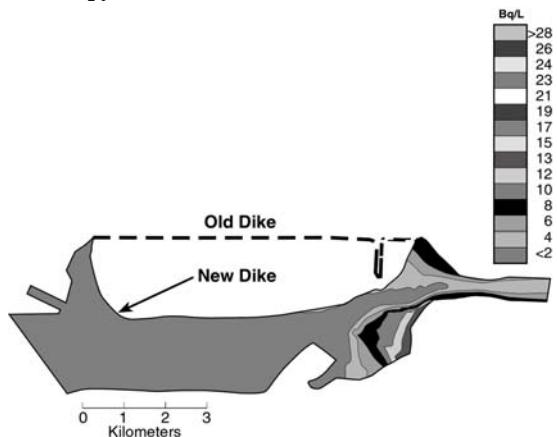


Fig. 12 Predicted flow and ^{90}Sr concentrations in the Pripyat River with the New East Bank Dike



Fig. 13 Current Chernobyl Shelter

除染対策としての New Safe Confinement の効果を示す為、New Safe Confinement があるかないかで 100 年間で、地下水による ^{137}Cs の移行がどのように違うかの予測を Fig. 15 と Fig. 16 に表す。この除染対策がない現在の状態では、 ^{137}Cs は地下水中 150 メートル程プリピヤト河に向かって移行するが、この新しい建物の建設によって、 ^{137}Cs の移行はない場合の 1/3 の 50 メートルに減ると予想される。

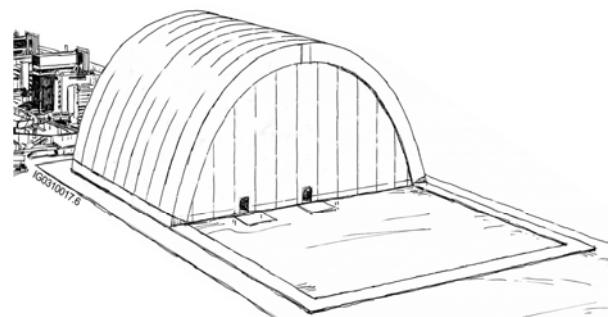


Fig. 14 Chernobyl New Safe Confinement

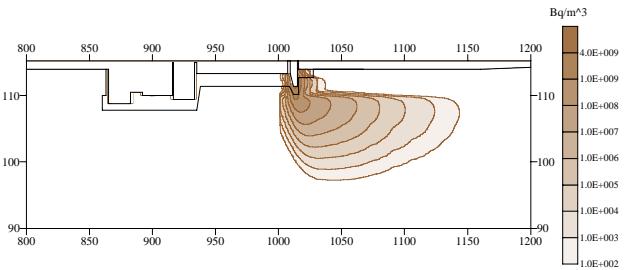


Fig. 15 Predicted ^{137}Cs concentration after 100 years without New safe Confinement

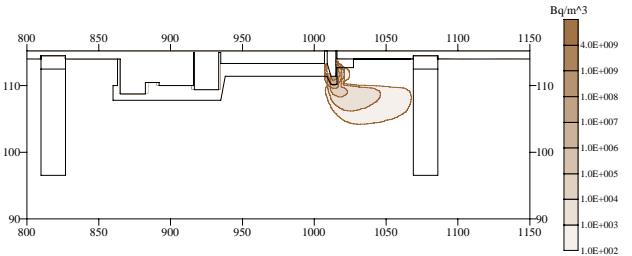


Fig. 16 Predicted ^{137}Cs concentration after 100 years with New safe Confinement

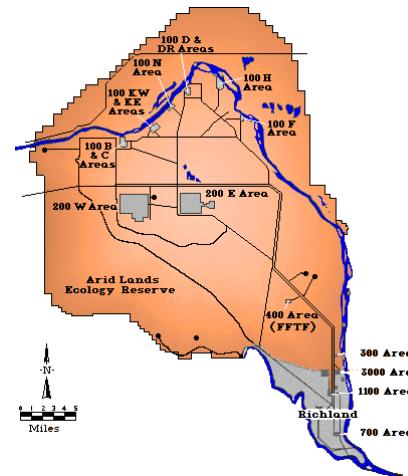


Fig. 17 Hanford Site in Washington State, U.S.A.

2.4.2 ハンフォード地

米国ワシントン州東部に、Fig. 17 に示したエネルギー省のハンフォード地がある。ここに現在では運転していない 9 の原子炉と再処理工場があり、Fig. 18, Fig. 19, Fig. 20 に示すように、現在は、解体 → 汚染物除去 → 処理 → 貯蔵 → 処分等、施設のデコミと汚染された環境の除染作業が行われている。



Fig. 18 Hanford Site contaminated soil excavation



Fig. 19 Hanford Site clean-up

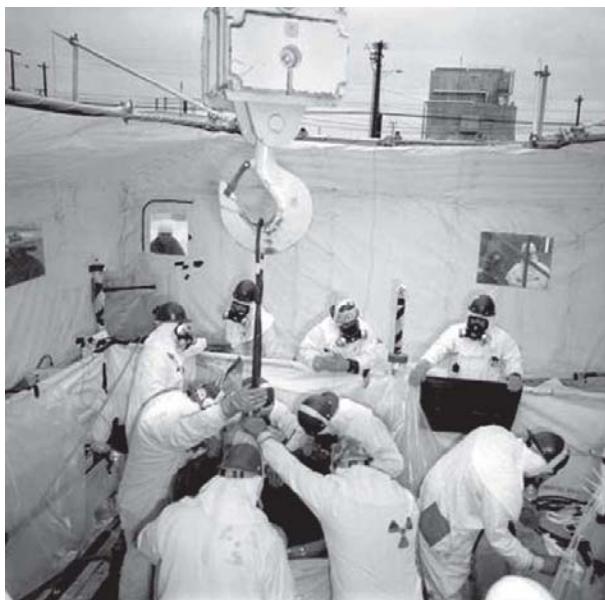


Fig. 20 Hanford Site remediation with workers having protective gears

3まとめと結論

環境中の放射性物質の濃度を減らすことと汚染経路を取り除くか、または縮小することにより、人体への被ばく量

を減らすことができる。ここで提案したウェブ上での除染分布図を含めた除染総合戦略プランニングの利点は次のようなものである：

- 除染ロードマップがつくれる
- 科学的な除染選択ができる
- 各汚染場所による除染方法、時期、効果が明確になる
- 廃棄物処理と処分のプランニングに有効である
- ウェブを通して、除染決定に地元の人達が参加できる。

これらの除染対策は、セシウムが環境に更に拡散する前に、包括的、かつ迅速に行なうことが有効である。福島原発事故による環境汚染現象は、必ずしも Chernobyl や Hanford 地とは同じでないが、これらでの除染対策例で示したような幾つかの除染技術と行政管理は福島原発事故の環境除染にも適用可能であると考えられる。

参考文献

- [1] Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology: Results of Airborne Monitoring by the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology and the U.S. Department of Energy, May 6, 2011, (2011).
- [2] 文部科学省：文部科学省による、プルトニウム、ストロンチウムの核種分析の結果について、平成 23 年 9 月 30 日の報道発表, (2011).
- [3] Onishi, Y., Voitsekhovich, O.V., and Zheleznyak, M.J. editors: "Chernobyl - What Have We Learned?", The Successes and Failures to Mitigate Water Contamination Over 20 years, Springer Publishers, Dordrecht, The Netherlands, (2007).
- [4] International Atomic Energy Agency: Generic Models for Use in Assessing the Impact of Discharges of Radioactive Substances to the Environment, Safety Series No. 19, International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria, (2001).
- [5] Onishi, Y., Serne, R. J., Arnold, E. M., Cowan, C. E., and Thompson, F. L.: Critical Review: Radionuclide Transport, Sediment Transport and Water Quality Mathematical Modeling, and Radionuclide Sorption/Desorption Mechanisms. NUREG/CR-1322, PNL-2901, prepared by Pacific Northwest Laboratory for the U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, D.C., (1980).
- [6] Wischmeier, W.H., and Smith, D.D.: Predicting rainfall erosion losses - A guide to conservation planning, Agriculture Handbook, No. 537, Science and Education Administration, U.S. Department of Agriculture, (1978).
- [7] Onishi, Y., Kivva, S.L., Zheleznyak, M.J., and Voitsekhovich, O.V. : Aquatic Assessment of the Chernobyl Nuclear Accident and Its Remediation, Journal of Environmental Engineering, American Society of Civil Engineers, Vol. 133, No. 11, pp. 1015-1023, (2007).

