

水圏環境修復に向けた取り組みとその実例

大西康夫 *1,2

東日本大震災とそれに伴う津波は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に向けた取り組みの為、アメリカと Chernobyl の実例を示しその方法を述べる。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重要汚染経路を取り除くかまたは縮小する必要がある。水圏(河川、湖、海)環境中では、放射性物質の土壤との吸着・脱着と環境中の放射性物質の移行、蓄積、再浮遊が起こり、水圏の環境特性は動的で物理・流体と化学機構が複雑に相互作用する。それ故、環境除染、健康保全、地元産業活動促進は現状態のモニタリングだけではなく、現在と将来の放射性物質の環境中での移行を調べる必要がある。著者が開発した水圏での放射性物質の移行・蓄積・再浮遊シミュレーションモデル、1次元 TODAM, 2次元 FETRA, 3次元 FLESCOT の汚染物動態評価と除染評価の適用例を示す。TODAM モデルは福島県の請戸川と高瀬川にも現在適用されている。除染決定には地元参加は不可欠である。

Keywords: 水圏環境除染、 Chernobyl, Hanford Site, river-estuary remediation

The 2011 Fukushima Daiichi Nuclear Plant's nuclear accident contaminated a significant portion of Fukushima Prefecture, and environmental remediation activities have been performed. To reduce the human exposure to the radiation induced by the nuclear contamination, one can reduce the radiation level in the environment, and/or eliminate radionuclide pathways to humans. This paper presents some case studies that are relevant to the Fukushima case. These examples include the Chernobyl nuclear accident's environmental and remediation assessments, U.S. Hanford environmental remediation activities, and the pesticide remediation assessment for the James River Estuary, Virginia, U.S.A. 1-D TODAM, 2-D FETRA and 3-D FLESCOT codes have been applied to the surface waters. TODAM code is currently being applied to the Ukedo and Takase rivers in Fukushima to predict cesim-137 migration in these rivers. A lesson learned from these experiences is that to achieve the effective clean-up, remediation decision makers must include knowledgeable scientists and competent engineers, so that environmental remediation activities are based on a scientifically-valid approach for a given contaminated location. Local participation to the remediation decision making is critically important.

Keywords: aquatic remediation, Chernobyl, Hanford Site, river-estuary remediation

1 放射性物質の被ばく経路と環境除染の考慮

原子力発電所や核燃料再処理工場等の原子力施設から環境中に放出された放射性物質は幾つかの経路を通して人体を被ばくする (Fig. 1 参照)。



Fig. 1 Radiation exposure pathways from a nuclear facility

Fig. 1 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。各々の被ばく経路の重要性は均等ではない。

例えば、環境中の単位放射性濃度あたり、¹³⁴Cs と ¹³⁷Cs の被ばく経路は地面からの放射と汚染された肉の摂取が人体に最も被ばく量が多くなる[1]。それ故地面の汚染度減少と汚染された肉の消費を減らすことが有効である。⁹⁰Sr には汚染された野菜と肉の消費を減らすこと、²³⁸Pu, ²³⁹Pu, ²⁴⁰Pu では空中への土壤再浮遊の防止と汚染された野菜の消費を減らすのが人体への被ばく量を減らすのに有効であ

る。

人々の保護の為には、環境除染評価を除染作業以前、作業中、そして作業以後に行なうことが下記の理由で必要である：

- 重要な汚染経路を見分け、その経路の除去
- セシウムの環境中での動態を把握
 - セシウム吸着・脱着
 - 環境中でのセシウム移行と蓄積
 - モニタリングは非常に重要、しかしそれだけでは十分ではない

また、環境除染・健康保全・地元産業活動は現在と将来のセシウム環境分布を下記の理由で考慮する必要がある：

- 除染作業の最適化
- 生活の安全性と経済手段の長期保障
 - 例：農業・酪農再開の影響
 - 清潔な水が必要
 - カリウム、アンモニア肥料は植物のセシウム吸収を減らすのに有効
 - カリウムや酪農からのアンモニアの流入 → セシウム脱着 → 河口水の汚染
 - 再汚染を避ける

実際の除染決定は水圏環境（河川・湖・河口・沿岸・地下水）の除染作業実現性と限定を考慮する必要がある。

これらを米国ハンフォードサイト、米国河川、 Chernobyl と福島の河川についてこの論文で述べる。

2 Hanford サイトと米国河川修復作業

2.1 除染決定と地元産業拡張への地元参加

1943 年、マンハッタン計画によって、ワシントン州東南

Aquatic environmental remediation approaches by Yasuo ONISHI (yasuo.onishi@pnnl.gov; yasuo.onishi@yahoo.com)

*1 Pacific Northwest National Laboratory, Battelle Blvd, Richland, WA, 99354 U.S.A.

*2 Washington State University, University Drive, Richland, WA, 99354 U.S.A.

部にある 1,800 平方キロメートルの土地が、核兵器用のプルトニウムを製造する秘密施設を設立する用地、ハンフォードサイトとして特定された。1944 年から 1986 年までの間、ハンフォードの 9 つの原子炉で、97,000 トンのウラン燃料が照射処理され、5 つの化学工場で再処理された。この照射処理されたウランから、67 トンに及ぶ兵器と燃料級プルトニウムが生産された。ハンフォードのプルトニウム生産任務は、最後の原子炉が 1987 年に、そして最後の再処理工場が 1990 年に閉鎖された時点で終了した。

プルトニウムの製造は多量の放射性廃棄物と化学廃棄物、および核物質を生み出した[2]。これらは、(a) パイプラインを通して 177 個の貯蔵タンクに詰め込まれた 200,000 立方メートルにおよぶ高レベル放射性廃棄物、(b) トレンチに埋められた 700,000 立方メートルにおよぶ低レベル廃棄物と超ウラン廃棄物、(c) 地面に排出された 10 億立方メートルにおよぶ汚染液体、(d) 地上施設に貯蔵された特殊な核物質(2,100 トンの照射済みウラン燃料と、カプセル 1,936 個のセシウム・ストロンチウム)、および (e) トレンチ、コロンビア河と大気中に排出された核分裂生成物で汚染された原子炉冷却水などである。

このサイトの除染・浄化作業は、1989 年に米国エネルギー省 (U.S. Department of Energy) が米国環境保護庁 (U.S. Environmental Protection Agency) とワシントン州との間で「三者合意」(Tri-Party Agreement) を結んだ時から本格的に始まった。この合意の特徴はその除染決定は法的拘束力をを持つということである。

この三者合意は、現地における廃棄物管理と、1,600 におよぶ地下タンクや、トレンチ、貯蔵所、地上施設、土壤、地下水などの汚染箇所の環境修復をより効果的なものにすることを主目的としている。現在これらの跡地には、合計 4.8×10^{18} Bq の放射能と 40 万トンの化学物質が残存し、それらは浄化中か処置待ち状態である。

除染決定への地元参加は「三者合意」で明確に示されている。例えばその一環として、ハンフォード諮問委員会 (Hanford Advisory Board) は全員合意での推奨事項およびアドバイスを作成・提出する。この委員会は多様な下記の 32 関連組織の組み合わせで構成されている：

- 地方行政府 (7 組織)
- 地元産業 (1)
- ハンフォード勤務者組織 (5)
- 地元環境保護グループ (1)
- 地域市民、環境、および公共の利益グループ (5)
- ローカルおよび地域公衆衛生組織 (2)
- インディアン部族政府 (3)
- オレゴン州代表 (2)
- 大学 (2)
- 一般大衆 (4)

エネルギー省、環境庁、ワシントン州政府はこの委員会に連絡係を派遣している。

2.2 地元産業の育成

地元は除染度と時期の決定に参加するだけでなく、将来のハンフォード土地利用や将来の地元産業の開発にも活発

に参加している。

除染作業が終わるに従い、その雇用は長期的に減っていくので、地元はその長期的な雇用の補いをする必要がある。

NPO である Tri-City Development Council (TRIDEC) が中心になって地元の市町村は地元産業の発展・誘致を積極的に行っている。例えばハンフォードの除染契約をコンタラクターが獲得する為には、除染作業以外に地元に貢献をしなければならないという項目が入っている。DOE からのコンタラクターによる地元貢献の要求は TRIDEC がエネルギー省にこの項目を契約条件として入れることを要求した為である。それによって、コンタラクターは地元の教育機関への多額の寄付、新しい産業を地元の大学と共同して開発、ハンフォード以外の仕事も地元で行うなど、様々な試みが行われている。

2.3 除染例

2.3.1 ハンフォード地下水除染

ハンフォードサイトでコロンビア川沿いに ^{90}Sr で汚染された地下水があり、コロンビア川への浸出を避けるため、地下水の除染が行われた[3]。これには Ca-citrate- PO_4 溶液を地中に注入し燐灰石を形成した。地下水に含まれた ^{90}Sr が燐灰石に遭遇すると、 ^{90}Sr は燐灰石中のカルシウムと交換し、 ^{90}Sr が燐灰石の一部となり、Fig. 2 に示すように地下水から除去された。

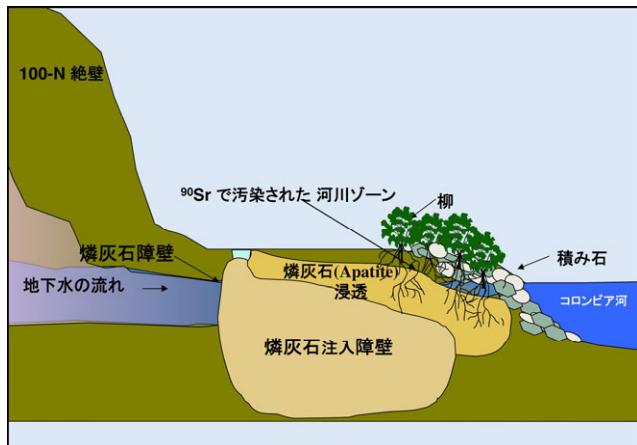


Fig. 2 ^{90}Sr removal from groundwater with apatite and Coyote Willow Trees

2.3.2 ジェームス川河口付近の除染

米国バージニア州にあるジェームス川の河口近くは殺虫剤、キーポン (kepone) が河口から 120 キロ上流で the Bailey Creek を通じて、ジェームス川に放出された。それによりジェームス川は河口まで汚染され、漁業が禁止された (Fig. 3 参照)。この殺虫剤は環境中で長く残留し土壤に強く吸着する。この特性はセシウム、ストロンチウム、プルトニウムと類似している。

ジェームス川に流入したキーポンは川の流れ、潮の満ち引き、浮遊土壤の移行・沈殿・再浮遊等で下流と上流を汚染した。Fig. 4 に FETRA モデルが予測したキーポンの水中での濃度 (水溶性と浮遊土壤と有機物に吸着したキーポンの合計) を示す[4]。実線の予測分布は除染を行わなかつた

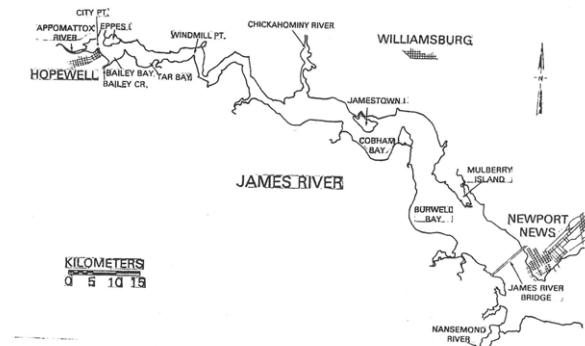


Fig. 3 Contaminated James River Estuary

場合である。河口から 75 キロほど上流（キーポンが川に流出された場所から約 50 キロ下流）で濃度が最高になっている。これはこのあたりで流速が遅く浮遊物が沈殿しやすくなっただけでなく、海からの塩分の為にキーポンを多く含んだ細かい浮遊土壌が凝縮して河床に沈殿した為である。Fig. 4 の下部にある A～J の実線は河床を浚渫した場所を示している。その河床浚渫の結果により減少したキーポンの水中での予測濃度がこの図に A～J の点線で示してある。例えば河口から 50 キロから 85 キロまでの約 35 キロに渡って河床を浚渫した場合（除染ケース D），水中での最高予測濃度は除染をしない場合に比べて約半分（0.018 $\mu\text{g/l}$ から 0.09 $\mu\text{g/l}$ ）に減少する。しかし、除染 G（63 キロから 74 キロの河床の除染）の場合は水中での濃度はほとんど減少しない。

この例に示すように汚染物（放射性物質や化学毒性物）で汚染された水圏環境を除染を行う場合、その効果を科学的に先立って評価する必要がある。

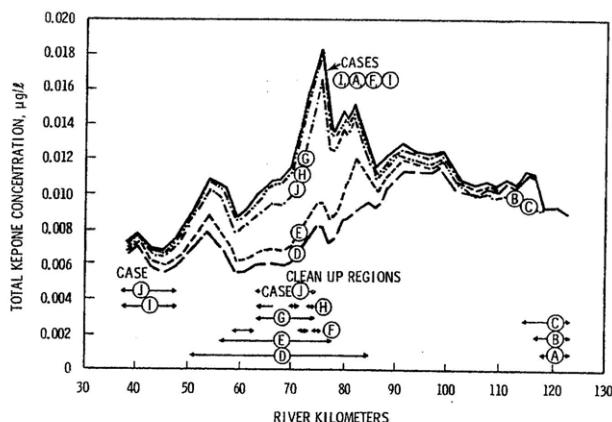


Fig. 4 Predicted effectiveness of various remediation schemes in the James River Estuary

2.3.3 チェルノブイリの汚染拡張の停止

チェルノブイリの場合、汚染された水資源の人体への影響を重要視し、多くの環境除染はプリピエヤト川とダニエプロ川は汚染しないように、また汚染が下流に広がるのを抑制する意図の下で行われた。その一例をここに示す。

ダニエプロ川の支流であるプリピエヤト川はチェルノブイリ原発のすぐ横を通っており、原発の付近の洪水領域にはチェルノブイリ原発事故で、 $3 \times 10^{14} \text{ Bq}$ の ^{90}Sr の核燃料

粒が沈殿した[5] (Fig. 5 参照)。

この洪水領域がプリピエヤト川の洪水時に大量の放射性物質を川に流し込み、下流のダニエプロ川の ^{90}Sr の最大の汚染源になる。洪水のうち、4 年に一度の確率で起こる洪水は非常に汚染されたこの洪水領域を薄く覆い、 ^{90}Sr を河に運び、いくつかの洪水の中で川の ^{90}Sr の濃度を最高にする。洪水領域の下流のヤノブ橋で予測された ^{90}Sr は 10 Bq/L で国の制限濃度を 5 倍超えていた。その対策として川沿いに堤防を建設し洪水領域への洪水を阻止することとした。

Fig. 6 と Fig. 7 に FETRA モデルで堤防がない場合と建設された場合の ^{90}Sr の濃度の予測分布を示す[6]。

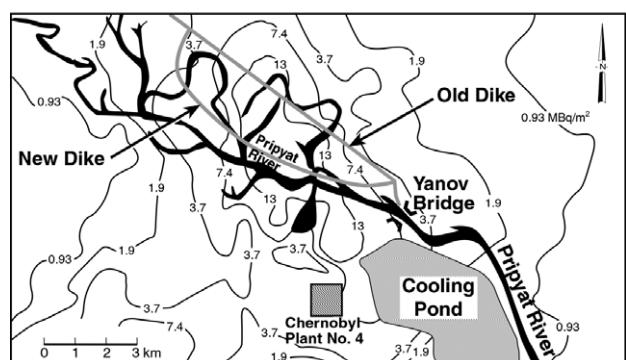


Fig. 5 Measured ^{90}Sr concentrations in the Pripyat River Floodplain across Chernobyl Nuclear Plant

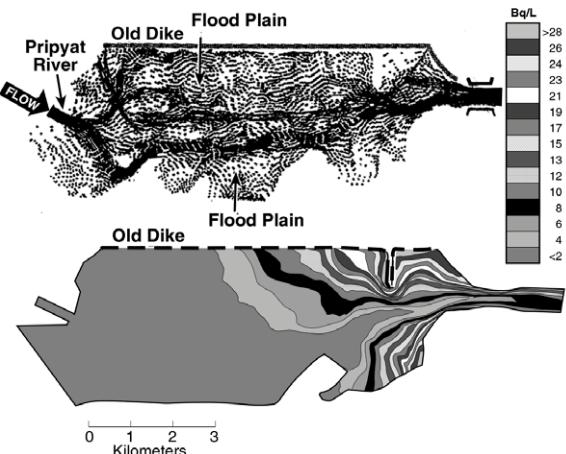


Fig. 6 Predicted Pripyat River flow and ^{90}Sr concentrations without a New Dike

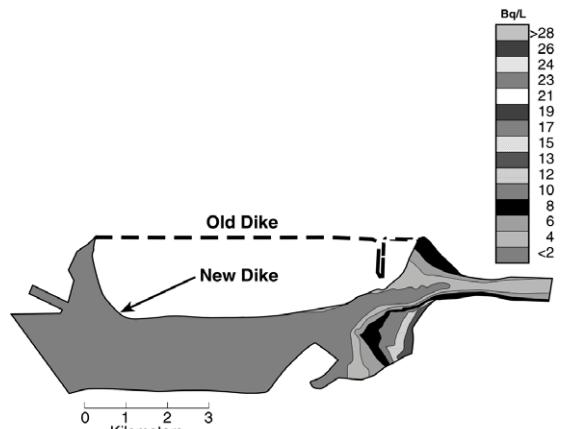


Fig. 7 Predicted ^{90}Sr concentrations with a New Dike

Fig. 6 に示すように、堤防がない場合予測された洪水域のすぐ下流での川で予測された ^{90}Sr は 10 Bq/L で、これに相当する実測値は 9~11 Bq/L であった。Fig. 7 に示すように、堤防を建設した後では FETRA モデルの予測は 5.5 Bq/L で、実測値と合致する。この堤防の建設によりダニエプロ川によるウクライナ人への被ばく量を大幅に減らした。

3 結論

福島原発環境除染に向けた取り組みの為、アメリカとチェルノブイリの実例を示した。この例で指摘した様に、人体を放射能から防ぐ為には、環境中の放射能を減らすか、人体への汚染経路を絶つか縮小することで達成できる。これらの除染作業の決定には地元参加が不可欠である。

効果的な除染を行う為には科学的根拠に則った環境評価と除染プランニングをすることが必要である。アメリカやチェルノブイリの除染経験は福島環境除染に有益である物もあると思われる。しかしこれ等の技術と知識を福島の環境に当てはめられるかどうかは、福島現地の特性を考慮する必要がある。

参考文献

- [1] National Council on Radiation Protection and Measurements, (Scientific Committee on Screening Models: W. L. Templeton, Till, J.E., Baker, D.A., Blaylock, B.G., Codell, R.B., Hoffman, F.O., Miller, C.W., Ng, Y.C., and Onishi, Y. Screening Models for Releases of Radionuclides to Atmosphere, Surface water, and Ground, NCRP Report No. 123, National Council on Radiation Protection and Measurements, Bethesda, Maryland, U.S.A. (1996).)
- [2] Gephart, R.E., and Gephart, Roy. Hanford, A Conversation about Nuclear Waste and Cleanup. Battelle Press, Columbus, Ohio, U.S.A. (2003).
- [3] Fellows, R.J. and Fruchter, J. "100-N Area Strontium-90 Treatability Demonstration Project: WBS-01: Phytoremediation Along the 100-N Columbia River Riparian Zone - Filed Treatability Study." PNNL-SA-61839, Pacific Northwest National Laboratory, Richland, Washington, U.S.A. (2008).
- [4] Onishi, Y. Contaminant Transport Models in Surface waters, Chapter 11, in: *Computer Modeling of Free Surface and Pressurized Flows*, M.H., Chaudrey and L. W. Mays eds., NATO ASI Series E, Applied Sciences- Vol. 274, Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, The Netherlands, pp. 313-341, (1994).
- [5] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR). Sources and Effects of Ionizing Radiation, Report to the General Assembly, Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, Vol. 2. United Nations, New York, pp. 451-566, (2007).
- [6] 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) .