

原子炉の基本は水だ

～福島第1原発の汚染水対策について～その2



グローバルウォーター・ジャパン代表 国連環境アドバイザー 吉村 和就

1972年荏原インフィルコ入社。荏原製作所本社経営企画部長、国連ニューヨーク本部の環境審議官などを経て、2005年グローバルウォーター・ジャパン設立。現在、国連テクニカルアドバイザー、水の安全保障戦略機構・技術普及委員長、経済産業省「水ビジネス国際展開研究会」委員、千葉工業大学非常勤講師などを務める。著書に『水ビジネス 110兆円水市場の攻防』（角川書店）、『日本人が知らない巨大市場 水ビジネスに挑む』（技術評論社）、『水に流せない水の話』（角川文庫）など。

メディアを賑わせている福島第1原子力発電所の汚染水問題。原発事故から2年以上経過したが、いまだに場当たりの汚染水処理が続けられている。筆者は会社勤務時代に原子力発電所の水処理（純水装置および復水脱塩装置、クラッドの除去、福島第2原発の除染作業）に関わったことがあるので、その観点から福島の現場で何が起きているのか、どんな作業が行われているのか、有効な対策はあるのかを独自の視点から述べてみたい。

ている。内訳は放射性希ガスが1億テラベクレル、ヨウ素131などハロゲン類が8100万テラベクレル、その他の核分裂生成物（ストロンチウム90、セシウム137など）が5億3000万テラベクレル。とりわけ問題なのは、燃料棒の溶融（東電の表現は損傷）やメルトスルー（メルトダウンした核燃料が圧力容器を突き破り外部に露出）寸前の可能性が指摘された1～3号機の炉心や、3～4号機の使用済み燃料プールだけで計6億7000万テラベクレルにのぼっていることだ（放射能総量の93%相当）。

らに汚染水漏えいにより、大気中、土壌、海水、地下水などに大量に放出されたとみられ、その量は放射能総量の1～2%とされているが、その全貌はいまだに明らかではない。

大気中に放出された放射性ヨウ素とセシウムの量は、旧経済産業省原子力安全・保安院や旧内閣府原子力安全委員会が別々の方法で試算している。それによると、ヨウ素131が13万～15万テラベクレル、セシウム137が6000～1万2000テラベクレルと推定されているが、土壌や海水、地下水への放出量は明らかではない。タービン建屋内などに滞留している高濃度汚染水は7万4000tで、セシウム137は12万6000テラベクレルと推定されている。問題は、放射

福島第1原発にあった放射能の総量

福島第1原発では現在、汚染水対策が進められているが、最終目的である廃炉作業に向けて、放射能の総量を確認する必要がある。原子炉が緊急停止（スクラム）した2011年3月11日時点で、1～6号機の格納容器（炉心）と使用済み核燃料貯蔵プールに存在した放射性物質の総量は7億2000万テラベクレル（テラ=1兆倍）と、東京電力が発表し

どこにどのくらい放射性物質が放出されたのか

ベント抜き作業や水素爆発、さ

福島第1原発1～3号機の原子炉の冷却状態

項目	1号機	2号機	3号機
給水系	2.5 m ³ /h	2.0 m ³ /h	2.1 m ³ /h
CS給水系	1.9 m ³ /h	3.5 m ³ /h	3.6 m ³ /h
RPV底部温度	20℃	34℃	33℃
RCV温度	21℃	35℃	32℃
窒素封入量	13.15N m ³ /h	16.45N m ³ /h	16.84N m ³ /h

※CS：炉心スプレイ RPV：原子炉圧力容器 RCV：原子炉1次格納容器
出所：2013年3月28日、東電発表

性物質の放出が毎日続いていることである。現在、1号機から3号機までは、強制的に冷却水を送り込むことで核燃料をとりあえず冷却しているが、これら核燃料の冷却は少なくとも今後10数年は必要と言われている。この間に不測の事態(大地震、津波、人為ミス、すべての外部電源の喪失など)が起きた場合、原子炉の冷却が不可能になり、さらなる放射性物質放出の恐れがある。

国際的な事故評価尺度 (INES) の変遷

事故直後、旧原子力安全・保安院と旧原子力安全委は国際的な事故評価尺度 (INES) の暫定評価をレベル4としていたが、11年3月18日に米スリーマイル島事故に匹敵するレベル5に引き上げられた。さらに統一地方選挙が終了した翌々日の4月12日、原子力史上最悪のチェルノブイリ原発事故に匹敵するレベル7に引き上げられた。

日本の原子力委員会が、国際原子力機関 (IAEA) に報告した内容では、①放出された放射性物質の総量を推定したところ、放射性ヨウ素換算で37万～63万テラベクレルになったのでレベル7に相当する。②放射性物質の放出は、チェルノブイリ事故では原子炉の爆発と火災が長引いたため520万テラベクレル放出され、福島はその1割程度だが、重大な外部放出事故と捉えレベル7と報告した。海外の原子力関係機関は当初から、重大事故のレベル7の可能性を指摘していた。オーストリア気象庁は11年11

表 汚染水量の低減対策案

項目	方策およびその内容	課題と成立性
①貫通部の止水	建屋に取り付くトレンチや配管の貫通部を塞ぐ	高線量地域であり、作業員の安全管理に問題
②地下水バイパスの活用	建屋の上流側に井戸を掘り地下水を強制排除する	建屋滞留水 (高線量) の漏えい防止、水質管理
③サブドレインの活用	建屋近傍の地下水排除	同上、高線量エリア管理
④建屋ギャップの止水	建屋のギャップを止水	高線量エリア作業
⑤陸側遮水壁の設置	陸側に遮水壁を設置し地下水の流入低減を図る	遮水壁の効果、地下水量コントロール、逆汚染の可能性

出所：汚染水処理対策委員会資料 (2013年5月30日)

月、キセノン133の解析をもとに、福島事故はチェルノブイリ事故の2.5倍に匹敵すると指摘していた。最近になり東電は、大気中に放出されたセシウム137の総量は12年3月時点で、チェルノブイリ事故の4倍と発表した。これは広島に投下された原爆の4023個分である。

汚染水量低減対策について

毎日流入する地下水400m³を低減させる様々な対策が検討されている。「汚染水量の低減対策案」の表をもとに、主な対策案を示す。

①の「貫通部の止水」については、外壁貫通部の総数は880カ所あり、このうち地下水に常時水没している建屋貫通部は590カ所で全体の67%を占め、トレンチおよび共通配管ダクトなどに接続する貫通部は278カ所である。現在までに止水されたのは3カ所にとどまっている。①～④の止水作業は、高線量下での滞留水の吹き出しにより、汚染事故や気体状の放射性物質の放出も考慮しなくてはならない。遠隔操作できるロボットなどの活用である。また、

ある貫通部を止水した時、さらに他の貫通部から倍量の流入がみられることもよくある現象である。

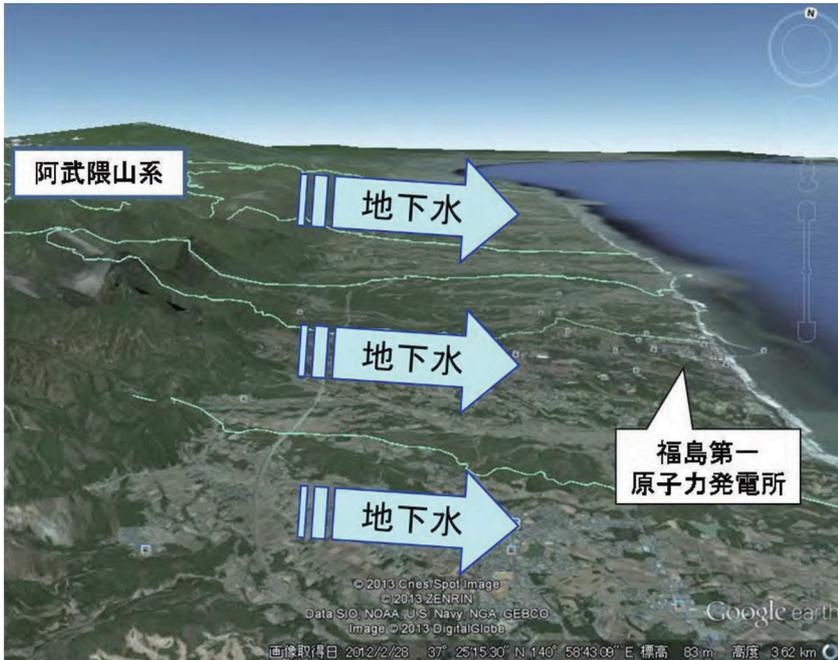
さらに心配なことは地下水の水位と降雨量との関係である。東電のデータによると、サブドレイン水位と地下水位との相関係数は0.66、降雨量と地下水流入量との相関係数は0.59であり、両方とも降雨に対してかなり敏感に反応していることが明らかになっている。東電は、流入する地下水のうちももとの地下水によるものが300m³/日、雨水によるものが100m³/日と仮定しているが、その根拠は不明である。

遮水壁設置について

⑤の「陸側の遮水壁の設置」については、5月にゼネコン3社から提案がなされ、鹿島の提案した凍結工法が有力視されている (経産省は5月30日に東電に対し凍土壁方式を採用するよう指示を出した)。

鹿島の基本計画案では、1～4号機を囲むように地盤を1.4kmにわたって掘削、その地中に一定間隔で管を並べて打ち込み、管内に冷却材 (マイナス40℃) を循環させ、土壌

福島第1原発敷地周辺の地下水の流れ（イメージ）



©Google 出所：汚染水処理対策委員会資料（2013年5月30日）

流失し、汚染水を海に拡散させることになる。逆に海側が先に凍結すると、上流側の地下水位が増すことになり、建屋にさらに地下水を流入させる結果となる。地下水と建屋内汚染水との水位バランスが決め手であり、実施に当たっては、実測データによる精密モデルを作り、シミュレーションを繰り返す必要があるだろう。

凍土による遮水壁については、計画策定までに6カ月、施工に約1年かかる。また、大規模な凍土壁の施工で10年を超える運用実績はなく、連続的に冷凍機を運転させるコストの課題も指摘されている。今までの地下水対策がすべてモデル通りにいかなかったことを反省しなければならない。

を凍らせて壁を作る。この凍土壁が建屋内と外側の地下水の動きを遮断する計画である。特徴はコンクリート壁による遮水方式と異なり、施工が容易で工期も1～2年で施工可能なこと。仮に冷却に必要な電源を失っても凍土壁は数カ月は解けずに遮水能力は保たれるという。

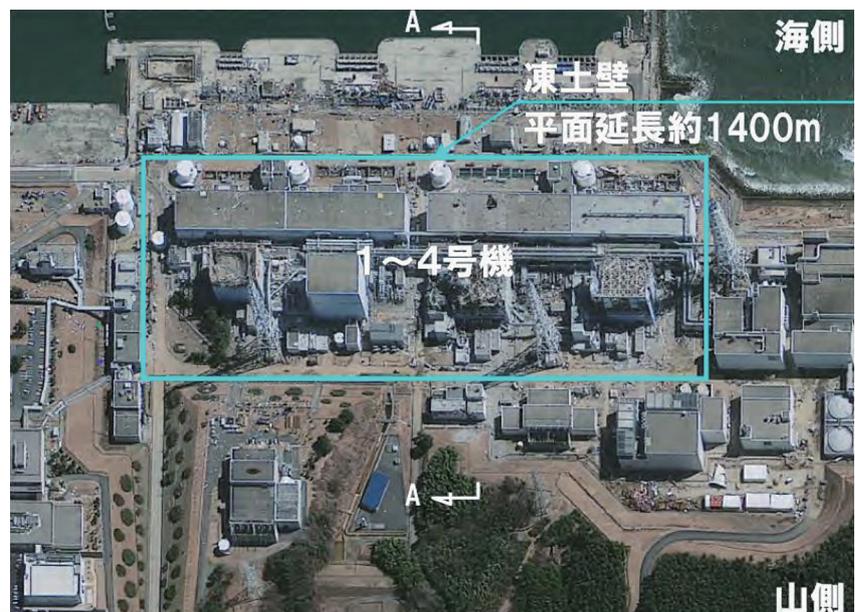
他の工法（粘土壁方式、グラベル〈碎石〉方式）に比べ良い提案のように思えるが、水の専門家から見るとさらなる検討が必要と思われる。1日400t流入する地下水の怖さが理解されていないからだ。計画では、山側と陸側を同時に冷却開始し凍土壁を作ることになっているが、長さ1.4kmの壁を同時に凍結させることは不可能であり、必ず水道ができる。山側の凍土壁に未凍結の隙間ができると、パスカルの原理と同じように凍土壁で遮られた地下水圧が隙間にかかり、地下水流量が増加する。そ

の結果、建屋内にさらに流入する地下水が増す。一方、山側に凍土壁が連続でできた場合、下流側のタービン建屋内の汚染滞留水は、残留している地下水に吸引される形で海側へ

処理水中のトリチウム問題

海域に処理水を放流する場合、大きな問題は多核種除去装置（ALPS）

凍土壁による遮水方式



出所：汚染水処理対策委員会資料（2013年5月30日）

汚染水中のトリチウム

・汚染水中のトリチウムは、原子炉内でウラン燃料が核分裂した際に生成されたもの。

例えば

$$U^{235} + n \rightarrow Sr^{96} + I^{135} + T + 2n$$

ウラン 中性子 スロンチウム ヨウ素 トリチウム 中性子

・汚染水中のトリチウムは、水分子と同じ形態で存在する。

H: 水素原子
T: トリチウム原子
O: 酸素原子

H₂O、水分子
HTO分子: トリチウムの存在形態

東京電力福島第一原子力発電所廃炉対策推進会議資料（2013年4月15日）

でも除去できないトリチウム（三重水素）の除去である。汚染水中のトリチウムは原子炉内でウラン燃料が核分裂した際に生成され、水分子とまったく同じ状態で存在するため、現段階では物理的にも化学的にも普通の水と分離することは難しい。半減期は約12年であり、弱いベータ線を発する。

トリチウムの処理については、カナダ型重水炉（CANDU炉）において重水（D₂O）を減速材として使用しているため、軽水炉より大量のトリチウムが発生、その処理対策に取り組んできたが、根本的な解決策は見出されていない。福島第1原発の滞留水のトリチウム濃度は100万～500万Bq/Lと推測されている。東電では、水として存在するので人体にも魚介類にもほとんどとどまらず排出されるとみている。また、セシウム134や137に比べ単位Bqあたりの被ばく線量（mSv）は約1000分の1であり、他の放射能物質と比べて安全性が高いことを強調している。しかし多くの学者からトリチウムによる遺伝子への影響が指摘されている。

大深度地下貯留法が決め手の汚染水対策

今後どのくらい汚染水が増加するのであるか。政府の汚染水処理対策委員会では、2014年4月に約45万t、15年4月に約55万t、16年4月に約63万t、21年1月に約80万tになった後、横ばいになると予想。今後、貯蔵容量の増加が急遽必要になるリスクに備え、常に半年分の空き容量を確保する必要性を指摘している。長期的な視点では、①タンクの大型化②洋上タンカーへの貯蔵③大深度スペースの活用一を挙げている。

筆者は今後40年間、この汚染水と闘うことを考えて、大深度地下貯蔵方式を推奨したい。大深度シールド工法は日本が世界に誇る技術であり、世界で実績がある。推奨する第一の理由は、大容量貯蔵スペースが容易に作れることである。地震に対する安全性も高く地上に比べて地下空間の揺れは地上の数分の1と言われている。海底トンネルに見られるように遮水性の高い構造物が

作れる。現在処理できない核種も、将来技術開発が進むまで長期保管ができる。万一、地上タンクに不具合が生じた時の対策として使える。具体的なイメージは首都圏外郭放水路（深度50m、容量約43万m³）と同じで立坑とトンネルで構成される。

原発敷地内の地下深度50～100mに、直径30m、長さ1000mのトンネルを2本構築すれば、140万tの貯留ができる。内部を仕切ることにより地下水の受け入れ、汚染水貯蔵、万一の事故の際の給水タンクとしても使える。掘削土は建屋周辺に覆土（1～2m）すれば、空間線量がほとんど遮蔽され、今後の廃炉作業の効率が格段に増すであろう。

原発インフラ輸出に、汚染水対策のノウハウを生かせ

日本は今まで世界に例を見ない原発事故に遭遇し、技術者の努力で一歩一歩解決しつつある。現在世界中で原発427基が稼働し、増設も目白押しである。近隣諸国を見ると、韓国では現在21基が稼働し、今後7基増設される。中国では14基が稼働中で、56基の増設計画があり、台湾では6基が稼働し、2基が増設予定である。ベトナムやインドからも日本は受注指名を受けている。ここで得られた事故の対策ノウハウを世界に提供することにより国際貢献することが、日本の望まれる姿である。常に原子炉の基本は水であることを忘れてはならない。E