

放射線防護学からみた環境とエネルギー¹

安斎育郎^{2*}

Environmental Aspects of Energy Utilization as Viewed from Radiation Protection

Ikuro ANZAI

Director, Anzai Science & Peace Office (ASAP)

Abstract

Since the outbreak of the Fukushima nuclear power plant accident in 2011, the author has frequently been requested by various people of different walks of life to make talks on the effects of ionizing radiations caused by the radioactive substances released from the plant. People seem to be deeply interested in the effects of low level radiation exposure. The author believes that radiation exposure should be minimized but, at the same time, that the people living in more or less contaminated area should be free from prejudice and discrimination based on groundless rumors. The author has been trying to inform people of the reality based on the investigations into the accumulated radiation doses actually received by the people living in Fukushima city including kindergarten children together with the environmental contamination in their life sphere. On the other hand, the author has a very strong impression that people have not been enough educated or informed of historical process how nuclear power plants have been introduced into Japan since 1950s. The present paper deals with two different aspects of this issue, i.e. one from the radiological health point of view and the other from the social science point of view in reference to the author's experiences since 1970s.

1. 緒言

東日本大震災に誘発されて発生した福島原発事故は、日本のエネルギー政策、とりわけ、電力生産のあり方に根本的な再考を迫るものだった。しかし、エネルギー政策のあり方そのものよりは、国民の多くは事故から3年余を経過した今でも、被災地の住民はもとより、遠隔地の都市住民も含めて、事故に起因する放射線被曝の影響について懸念をもち続けているように見える。とりわけ、乳幼児をもつ若い母親たちの関心は高く、保育園での散

1. 平成26年6月5日 本会第132回例会において発表

2. 安斎科学平和事務所

歩に対する懸念や、被災地産の食材を用いることへの不安など、放射線防護学的には過剰反応と思われるような状況を含めて広く存在し、時としてそうした懸念や不安が、被災地住民に対する偏見や差別、被災地産の食品に対する風評被害の原因にもなっている。

筆者自身は、アメリカの対日エネルギー戦略と密接に関連して、日本の政財界が電力生産方式を水力発電→火力発電→原子力発電と変容させ、北欧などよりもはるかに有利なはずの自然エネルギー開発に力点を置かずにつれてきた「社会的背景」を国民が理解し、主権者に相応しいエネルギー政策の選択者として主体的に行動することこそが一層重要であると考えるが、福島原発事故以来数百回にわたって要請された講演のテーマの大半は、放射線の影響に関するいわば「理科的側面」に関するものだった。2012年に『原発事故の理科・社会』(新

日本出版社)を出版したのも、そうした思いからに他ならない(同書の英語版として“Scientific and Social Aspects of the Fukushima Nuclear Disaster”(Anzai Science & Peace Office, ASAP)がある。必要な向きは送り先など明記の上ASAP事務所(FAX:075-741-7282)に連絡して頂きたい)。

そして、福島原発事故の現段階について市民が関心を振り向けるべき最も重要な課題は、専門家集団の間でも必ずしも見解が一致していない低レベル放射線の影響の問題に深入りすることではなく、以下のような諸点に厳しい目を向けることにこそあると感じている。すなわち、①事故原発内の溶融核燃料の実態の解明、②今後半世紀にわたる廃炉のための技術開発と確実な実行、③廃炉作業を担う膨大かつ良質の労働力の確保、④地下水の流入と汚染水問題の早期解決、⑤海産生物の汚染実態の調査と情報公開、⑥周辺地域の除染に伴う廃棄物の最終処分、⑦「当てのない仮設暮らし」の延伸ではなく、「希望のある定住生活」への移行の推進、⑧被災者の外部被曝・内部被曝の実態把握と低減化策の着実な実施、⑨被災住民の健康管理(とりわけ、若年齢層の甲状腺診断)の着実な実施と結果の開示、および、セカンド・オピニオンに対する誠実な対応、そして、⑩数百・数千世界に高レベル放射性廃棄物という「負の遺産」を残すこととの非倫理性の問題を含め、今後の電力生産政策をどうするのか、といった問題である。

本稿ではまず、現在の福島の汚染や被曝の実態についての筆者の活動について述べ、後半で、より社会的な観点から福島原発事故が提起した社会的側面について述べることとする。

2. 汚染および被曝実態の調査とリスク極小化への提言活動

著者は、福島原発事故が発生した2011年4月に、上に言及した「安斎科学・平和事務所」(ASAP)を開設し、福島の放射能汚染の実態調査や、保育園児を含む被災地の人々の被曝の実測を行ない、その結果を踏まえて「被曝リスクの極小化」に向けた実践的な提言活動を行うための「福島プロジェクト」を立ち上げた。これは、現在、桂川秀嗣氏(東邦大学名誉教授、原子核工学)や、ヨウ



Fig.1 Hot Spot Finder (HSF, ポニー工業株式会社製)

化セシウムによるガンマ線検出器とGPS機能を結合したHot Spot Finder (HSF、検出器を装着して移動した場所の空間線量率が、パソコン画面上に数値および色分けで表示される方式の測定器、Fig.1 参照)の開発・改良に当たっている山口英俊氏(株式会社 SWR)および早川敏雄氏(太陽エンジニアリング株式会社)と共同して、毎月3日間のペースで福島県下の各地を訪れ、保育園・幼稚園・小学校・個人宅などを測定し、その結果を踏まえて散歩道の見立てやホットスポットの除染対策について提言する活動に取り組んでいる。

保育の分野に例をとれば、外部被曝・内部被曝に対する心配から散歩を手控え、地場産の食品を給食に利用しないといった傾向が広く見られ、その傾向はなお残っている。

保育年齢の子どもたちにとって、「散歩」は心身の発育上極めて重要なことであるが、「放射線リテラシー」(放射線に関する情報を正確に読み解く基本的素養)を十分に身につける機会をもたなかつた多くの保護者にとって、子どもたちを放射能環境のもとで散歩させて大丈夫か、汚染しているかもしれない地場産の野菜などを給食用の食材として利用して問題ないかといった不安があるのは当然ではある。¹

著者は、福島原発事故後の2011年4月16日、いわき市から浪江町まで北上しながら空間放射線量率を測定し、田畠の土を採取し、要請に応えて講演や相談活動を行なった。翌5月8日には福島市で開催された保育関係者の学習講演会に講師として赴き、それを機縁に市内渡利地区(相対的に放射性物質の降下量が多かった地域で、

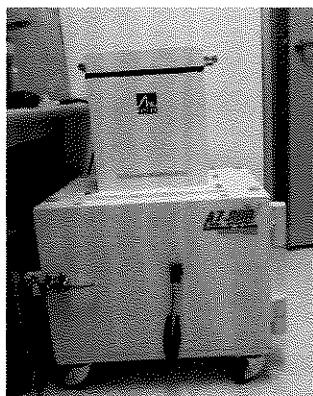


Fig.2 Device for gamma ray analysis (AZ-800V, Anzai Medical Company)

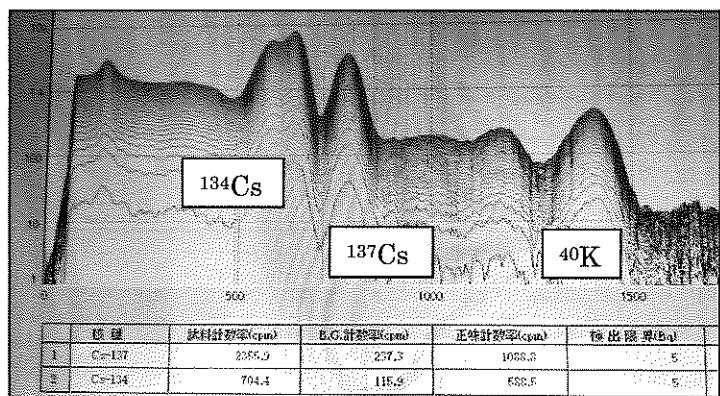


Fig.3 Gamma ray spectrum of a contaminated straw rope for fixing a cherry tree in a kindergarten ground. (August 2012)

事故原発からはおよそ 60 km に位置する) にある「さくら保育園」の汚染実態の調査や実践的な除染方法の提言活動に取り組むようになった。外部被曝に関しては、その後、同園の姉妹園である「さくらみなみ保育園」をはじめ、保育園の園舎内、園庭、散歩コースの放射線量率の調査を希望するいくつもの保育園で調査を実施し、必要に応じて測定結果を踏まえた報告学習集会で講演を行なったりした。また、「さくら保育園」については、使用する食材の放射能検査を園独自に行ないたいとの希望があり、安西メディカル株式会社製の簡便な測定器（環境用試料放射線（ γ 線）測定装置 AZ-800V、Fig.2）の導入を支援した。鉛遮蔽体装備のヨウ化ナトリウム検出器にガンマ線スペクトロメータをつなぎ、パソコン上にスペクトルおよび放射能濃度の分析結果を表示（Fig.3）できるようにしたもので、試料容器に入る大きさの食材をそのまま測定できるため、基準以下の食材についてはそのまま調理に利用した（基準は、国の基準（ $100\mu\text{Sv/kg}$ ）の 10 分の 1 の $10\mu\text{Sv/kg}$ に設定した）。また、この測定システムは、保護者が汚染を気にかけている食材や、子どもたちが近隣環境中で捕獲したザリガニなどの放射能測定などにも利用され、汚染の実態を把握し、結果として過度の不安を払拭する上でも用立てられた。

また、園児を含む保育園関係者の積算被曝線量については、2012 年 12 月～2013 年 11 月の 1 年間、長瀬ランダウア製クイクセルバッジを「さくら保育園」および「さくらみなみ保育園」関係者合計 150 人余に無償提供し、

月間線量の推移を観察した。園児らには、入浴時などを除いてできる限り線量計を装着してもらい（Fig.4）、毎月これを回収して月間被曝量を測定した。

その結果を Fig.5 に示す。被曝線量は漸減傾向にあり、2003 年 11 月時点での月間被曝線量は 0.010～0.014 mSv 程度のレベルであった。夏休みに両園ともやや増加傾向にある点は、除染の進行状況などにより、住居およびその周辺の方が保育園よりも線量率が高いケースがあることを反映している。今後も被曝線量は漸減傾向を示すものと思われるが、少なくとも、相対的に放射能汚染が



Fig.4 Children hanging a dosimeter for measuring accumulated radiation dose

高いと言われている福島市渡利地区の保育園関係者の年間被曝線量は幸い $0.2\mu\text{Sv}$ に満たない程度で、日本人の自然放射線による被曝線量（年間 $2.1\sim2.2\mu\text{Sv}$ ）の 10 分の 1 に満たない程度であることが示された。こうした実測値は、二つの意味において有用な意味をもっている。

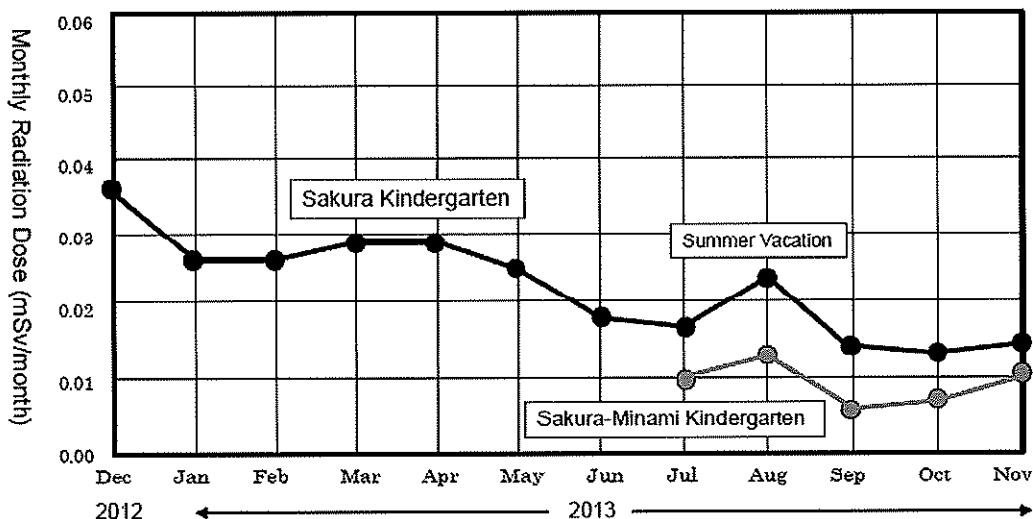


Fig.5 Average Monthly Radiation Dose of Children and Care Staffs of Kindergartens in Fukushima City (December 2012–November 2013)

第一に、園関係者が実際の被曝線量が深刻なレベルではないことを客観的に理解する資料として役立つこと、第二に、被災地外の人々が客観的根拠なしに「被災地の人々=重大な被曝」といった事実誤認に陥り、そのことによって被災者に対する偏見や差別感情、被災地に対する事実無根の風評を抱く恐れを払拭するために役立つこと、である。

言うまでもなく、放射性降下物の濃度分布には大きな不均等性が観察され、除染作業の進捗や効果にも地域差があるため、福島市の渡利地区の状況を単純に一般化することは適切ではないため、著者らは要請に応じて県下のさまざまな場所（福島市内全域・郡山・いわき・楢葉・南相馬・相馬など）で測定を行なっているが、実態の見極めとともに、被曝の極小化のために何が可能かを実践的に提起し、可能な場合には調査の過程で試験的に除染を実施するように心がけている。

これまでの調査結果によれば、福島市内で散歩を実施していない保育園周辺においても総じて放射線量率レベルは毎時 $0.1 \mu\text{Sv}$ 台～ $0.3 \mu\text{Sv}$ 台に低下しつつあり、一般的には、放射線量率の実態の面からは、幼児期に重要な意味をもつ散歩を禁じる合理的な理由があるとは考えにくい。

仮に、保育所内の被曝が毎時 $0.1 \mu\text{Sv}$ 程度であるの

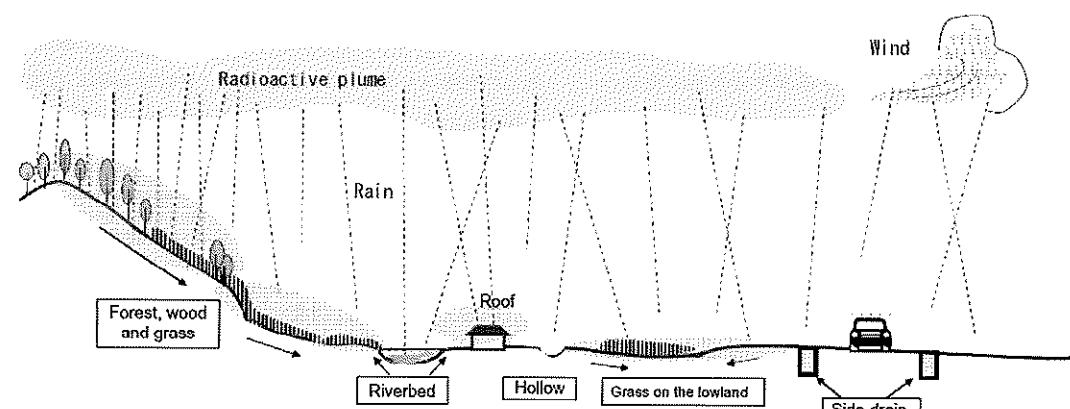
に対し、散歩中には平均して毎時 $0.25 \mu\text{Sv}$ の被曝があるとすると、散歩による余分の被曝は毎時 $0.15 \mu\text{Sv}$ 程度ということになる。平均散歩時間を 1 時間とすれば、1 回の散歩あたり $0.15 \mu\text{Sv}$ 程度を余分に被曝することになるが、このような散歩を年間 150 回実施した場合、余分の被曝は $0.15 \times 150 = 22.5 \mu\text{Sv}$ ($\approx 0.02 \text{ mSv}$) 程度と推定される。日本人が自然界から受けている年間自然放射線被曝量 ($2.1 \sim 2.2 \text{ mSv}$ 程度) の 100 分の 1 程度に相当する。² 結論的には、「放射線被曝の極小化」の努力を続けながら散歩を実施することは、散歩がもつ重要性から考えて重要なことであろう。

人間は「立って歩く」（直立二足歩行）ことによって、のど（喉）の部分がまっすぐに立ち、狭い喉を通過する「食べ物」は胃に、「空気」は肺に振り分ける「気食分離」の必要が生じた。そのために、舌・唇・顎・喉頭・咽頭の筋肉を細かくコントロールするための脳神経や筋肉が高度に発達した。さらに、肺に吸入した空気を吐き出す時にこれらの筋肉を巧みに操って音色の違う声を発し、感情を豊かに表現したり、美しい歌を唄ったり、細やかにコミュニケーションをとったりすることが可能になった。幼時期にこの機能を発達させることは、人間発達学上も非常に大切な意味をもっている。そして、「歩く」ことによって足の筋肉を発達させることは、心

臓の血液循環機能を補助する重要な意味をもつことも医学的に知られている。また、散歩を通じて、四季折々の自然の変化や、社会のさまざまな様子を感じ取り、生活する上で守らなければならないルールについても学習することができるなど、散歩の意義は思いのほか大きい。放射線リテラシーの普及の遅れや、環境中の放射線量率分布のきめ細かな実測の不十分性ゆえに、被災地の子どもたちの発達に支障がもたらされることは合理的に避けられるべきであろう。著者らは、従来も保育者や保護者からの相談に応えるよう努めてきたが、今後も、保育園・幼稚園・小中学校・個人宅など、放射線・放射能についての疑問や不安に対して、規模の大小を問わず、無償で実態調査と被曝極小化への提言活動を続けていきたいと考えている。

著者は、今後とも、こうした環境放射線に関する調査をより広範囲にきめ細かく実施し続けることが重要であると考えているが、同時に、放射線被曝によるリスクの極小化に関しては、放射能汚染の実態や放射性物質の

挙動に関する基本的知識を人々に知らせ、それを減らすための放射線防護学的な基本的方法（①除染、②遮蔽、③距離、④時間短縮）を教育（家庭教育・学校教育・社会教育・生涯教育など）を通じて普及し、市民自らが実践できるための基本的素養を習得する努力を続けることが大切であると考えている。参考までに、学習講演会などで紹介している資料をFig.6およびFig.7に示す。福島での生活環境の放射線量率は全体として減少傾向にあるが、日常の生活空間の近傍には明らかにホットスポット点在しており、その見立ても十分には出来ていない実情がある。河川敷公園などでは、地方行政の担当課が異なる汚染地が隣接しており、除染対策の違いによってある境界線を境に放射線レベルが著しく異なるケースも珍しくない。人々の多くは、どのような場所に放射性物質が残存しているかについても十分な知識がなく、それらが行政任せ、専門業者任せでなくとも、市民自らの手で除染可能性あることも十分には認識されていないし、被曝のリスクを減らす原則的な4つの方法（除染・



Places where high contamination exists

- Rough, grained, uneven or shaggy places
- Bare, sandy or grassy places below sloping lands
- Roof, rain gutter, drain spout, puddle and hollow
- Side drain for road (especially with bad water flow)

Fig.6 Where are "hot spots"?

Decontamination

(Removing radioactivity)

- Professional decontamination service
- DIY removal of contaminated surface soil and burial into a pit where people do not approach

Shielding

(Putting shielding materials)

- Putting concrete blocks, bricks, filled PET bottles, metal plates, sandbags, gizzard, etc.
- Covering side drain or roadway gutter with concrete plates.

Distance

(Stepping away from hot spots)

- Identifying radioactive hot spots in the living environment.
- Taking measures especially for children not to be able to approach hot spots

Time

(Shortening exposure time)

- Radiation level of the room where family members stay long should be kept low.
- Bed rooms for children needs special concern because of long sleeping hours.

Fig.7 How to reduce radiation dose

遮蔽・距離・時間)をどう具体的に適用するかについても習熟していない。したがって、今後も数十年単位で、①汚染実態の決め細かな見立てと情報の公表、②被曝減少のための実践可能な方法の普及の推進と実践、③放射線・放射能に関するリテラシーの家庭教育・学校教育・社会教育・生涯教育などを通じての普及と、それを担うインストラクターの育成、などを地道に持続的に進めていくことが極めて重要である。

3. 福島原発事故の社会的側面—将来のエネルギー政策の選択のために

著者は東京大学工学部原子力工学科の第1期生(1964年卒業)であるが、大学院時代から東京大学医学部文部教官助手(放射線健康管理学教室)を務めた60年代~70年代は、日米同盟関係を基軸とするアメリカのベトナム戦争や、重化学工業化路線を基調とする日本の高度経済成長政策の中で、生命や環境に関わる重大な社会問題が顕在化した時代であった。自ずから、科学者・技術者・

企業・国家の社会的責任が厳しく問われた時代であり、著者も1960年代の後半から日本の原子力発電政策について社会的な眼を向け、原子力発電の可能性を認めながらも、日本政府の開発政策のあり方を巡っては批判的な活動に取り組んでいった。そうした批判的活動の一つの結節点となったのが、1972年12月に日本の科学者の公的代表機関である日本学術会議が初めて開催した原子力発電に関するシンポジウムの基調講演者として招請され、「6項目の点検基準」を提起して全面批判を展開したことであった。「6項目の点検基準」とは、①エネルギー開発の自主性、②経済開発優先主義の否定、③軍事転用への歯止め、④内発的地域開発の尊重、⑤住民と労働者の安全の実証的保障、⑥原子力行政の民主性であったが、現在においてもこれらの点検基準は依然として重要な意味をもつていて確信している。以下、これらの基本認識を踏まえながら、なぜ1945年の広島・長崎原爆の惨状と、1954年のビキニ水爆被災事件を経験した日本が、54基もの原子力発電所をもつ「原発大国」になつたのかについて社会的な側面から検討する。

(1) 原爆被害の隠蔽

アメリカの映画監督オリバー・ストーンは、歴史研究者ピーター・カズニック（アメリカン大学）と協力して、2012年、ドキュメンタリー番組『もうひとつのアメリカ史』を制作し、太平洋戦争を終結させるために広島・長崎への原爆投下は必要だったことを豊富な資料映像によって明らかにした。日本軍は戦場で敗走を重ね、兵器や軍需物資は不足し、都市や産業は空襲で破壊されて疲弊し、生活苦に苛まれていた国民の多くは戦意を喪失しつつあった。しかし、アメリカは、広島・長崎に原爆を投下し、戦後もソ連を「核抑止力」によって抑えこんで世界を支配する戦略をもっていた。したがって、広島・長崎の悲惨な実状が世界に伝えられれば、「戦時であっても原爆のような非人道的兵器は禁止されるべきだ」という世論が起こり、核兵器の禁止に向かう可能性があった。アメリカは、「報道管制（press code）」を敷いて原爆被害の報道を厳しく禁止した結果、世界は核兵器の非人道性を十分理解できないまま戦後を迎えた。翌1946年、7月1日にビキニ環礁で行なわれた戦後初の原爆実験を皮切りに、アメリカは再び核兵器の開発・生産・配備・実験に乗り出した。

(2) 米ソ両国の核軍備競争

しかし、予期に反して、わずか3年後の1949年、ソ連がセミパラチンスクにおいてプルトニウム原爆の開発実験に成功した。核兵器が「抑止力」として機能し得るためにはその優位性が命であり、アメリカはソ連に対する優位性を保持するために水爆開発に乗り出した。軍事力の均衡を目指すソ連も時を同じくして水爆開発に乗り出し、1950年代初頭には両国ともに水爆の開発に成功、運搬手段の開発と威力の巨大化が追求された。その結果、1954年にアメリカがビキニ環礁で行なった水爆実験「ラボー爆発」³の威力は約15メガトンと言われ、一発で第2次世界大戦（1939年9月1日～1945年9月2日、60余か国が参戦、犠牲者は約5,000万人）で使用された全ての砲爆弾総量の5倍にも匹敵した。しかし、ソ連も同じように水爆の巨大化に突き進み、1961年にノヴァヤゼムリヤで実験した「ツアーリ・ボンバ」は約50メガトン（あるいはそれ以上）と言われ、第2次世界大戦17回分にも相当した。まさに「力による世界支配」の結果として行き着いた「暴力の極致」に他ならなかつた。

1950～60年代は、米ソ両国が世界を二分して争っていた時代であったが、「アトムズ・フォー・ピース」（平和のための原子力）という名で推進された原発開発は、それと密接に関わりながら進められた。

(3) 原発開発のルーツ

ビキニ水爆被災事件の3ヶ月後の1954年6月、ソ連はモスクワ郊外のオブニンスクで世界初の実用型原発（5,000 kW）の運転を開始した。当時、アメリカの原子力産業界は核兵器の生産によって国家から巨大な利益を手にしていた。初代原子力委員長だったディヴィッド・リリエンソールはモルガン系財閥と密接な関係にあったが、プルトニウム生産用原子炉や再処理施設をもつ国立ハンフォード研究所の運営管理をデュポン社からGE（ゼネラル・エレクトリック）社に移管、やがて同社とともに原子力産業界を二分することになるウェスチングハウス社も、原子力委員会と原子力潜水艦開発事業で独占的な契約を取りつけるなど、GEと同様、国家の核軍事戦略に深くコミットすることによって、開発投資のリスクの危険を回避しつつ膨大な技術的ノウハウと独占的利益を蓄積していく。しかし、それらの独占企業体は既存のエネルギー産業においても支配的な地位を占めており、当初は、不確定要素の多い原子力発電の事業化にはあまり積極的ではなかった。

しかし、ソ連の原発実用化によってアメリカは原発開発を急ぐ必要に迫られ、ウェスチングハウス社製の原子力潜水艦用の原子炉を原子力発電開発に応用する道を選んだ。したがって、アメリカの原発開発は、安全性を一歩一歩確かめながら技術開発を進めたものではなく、世界支配をめぐる米ソのせめぎ合いの中で、核軍事技術の転用という形で出発した。

(4) 日本の原発開発のはじまり

日本の原子力開発も、こうした動きと連動して始まった。ビキニ水爆被災事件のわずか2日後（1954年3月3日）、中曾根康弘・改進党代議士らが提案した原子炉建築予算が唐突に国会で成立した。中曾根氏は、前年、後のアメリカ大統領補佐官ヘンリー・キッシンジャー氏が統括する「ハーバード国際セミナー」に参加して「平和のための原子力」政策を注入され、日本への原発導入を展望していた。

産業界では、正力松太郎読売新聞社主がアメリカ大使

館、CIA、国防総省などと連携し、ビキニ事件によって巻き起こっている反米・反核世論を「親米・親原子力」に変えようとした。1955年には東京で「原子力平和利用博覧会」を開催するなど、原子力平和利用キャンペーンが繰り広げられた。

ところが、1957年、アメリカで「大型原子力発電所の大事故の理論的可能性と影響」と題する「ブルックヘブン報告」が出され、電気出力15万キロワットの原発が事故で放射能の半分を放出した場合、死者3,400人、傷害47,000人、最大70億ドルの損害（当時の日本の国家予算規模の約2倍）が発生する恐れがあることが示唆された。このままでは電力会社の参入が不可能だと考えたアメリカ政府は、原発事故時の電力会社の負担を軽減するための法律（プライス・アンダーソン法）を成立させた。4年後の1961年、日本も原子力損害賠償補償法をつくり、同じ道を歩み始めた。

(5) アメリカの対日エネルギー政策と原発

第2次大戦直後、日本は水力発電を主力とした。しかし、日本占領の中核であるアメリカは、食料とエネルギーを支配して日本をアメリカ依存型の国家にする方針をとり、日本の発電を水力発電か→火力発電→原子力発電と方向づけた。

1960年代の高度経済成長政策の時代、日本の電力需要は急上昇したが、三重県四日市の大気汚染公害に象徴されるように、火力発電所などの化石燃料の多消費は激しい大気汚染をもたらした。折しもアメリカは、「大気を汚染させない原子力発電」を喧伝して日本への導入を推進、日本の貿易黒字とアメリカの貿易赤字のギャップを埋めるために、アメリカから大量の濃縮ウランを輸入する政策もとられた。

(6) 石油危機が原発導入を加速

1973年10月には第4次中東戦争（エジプト・シリア対イスラエルの紛争）が起ったため、日本の産業界も、アラブ産油国からの石油輸入の先行きに危機感を感じ、原発の導入に舵を切った。田中角栄内閣は「電源開発促進税法」を成立させ、電力消費者が消費量に応じて支払う税によって電源開発のための資金を調達する道を開いた。年間3000億円以上に達する電源開発促進税を財源として、原発などを受け入れた自治体には特別交付金が支払われる仕組みが作られ、福島県や福井県など、内

発的な地域開発の展望を描きにくい自治体は原発誘致に傾いていった。

(7) 日本を原発大国にした10の理由

このようにみると、日本が原発大国になった背景には、下記のような多くの政治的・経済的要因が作用したこと

- ① アメリカが日本の電力生産をアメリカ依存型にするために、水力→火力→原子力と導いたこと、
- ② 日本政府がそれを受け入れ、忠実にその道を歩んだこと、
- ③ 電力企業が政府と癒着し、原発推進に走ったこと、
- ④ 原子力委員会などの官僚機構が、原発政策推進の役割を果たしたこと、
- ⑤ 原発推進の立場の専門家が、実証性のないままに「安全」「安価」を保証したこと、
- ⑥ マスメディアが「安全神話」「安価神話」を国民に流布したこと、
- ⑦ 地方自治体が電源開発交付金目当てに原発導入に傾いていったこと、
- ⑧ 一部の住民が原発誘致に動員され、原発政策を下支えしたこと、
- ⑨ 「原子力の日」（10月26日）作文コンクールなど、教育も原発推進に利用されたこと、
- ⑩ 原発訴訟が数多く起こされたが、司法が有効に歯止めの機能を果たせなかつたこと。

これらの状況の下で原発推進者たちは批判の声を圧殺し、独善的な「原子力村」を形成して暴走し、ついに破綻を来したように見える。今後、数十年から100年単位で放射能と向き合う生活を被災地住民に余儀なくさせた福島原発事故の深刻な事態を思うとき、また、原発依存によって数万年単位の高レベル放射性廃棄物が「負の遺産」として遺された事態の重大性を考えるとき、「環境とエネルギー」という視覚から見ても、単に放射線の影響に関する自然科学的な側面だけでなく、国際関係・政治・経済などに関わる社会科学的な側面をも見据え、将来世代に対する責任の問題も含めて真摯に検討し、「より平和で安全なエネルギー社会のあり方」を賢明に選び取らなければなるまい。

注

(¹) 2012年6月10日、著者が名誉館長を務める立命館大学国際平和ミュージアムの春季特別展「放射能と人類の未来」の一環として開かれた公開記念講演会「放射能リテラシーのすすめ」の機会に、放射線・放射能についての理解度についてアンケート調査を行なった。予備知識を与えずに、講演に先立って設問に回答してもらい、直ちに回収・集計して講演の中で解説を加えた。回答者は参加者の大部分に当たる163人だった。以下に、主要な設問についての回答を紹介する。

◇設問1：いずれ放射能を消すことができる薬品や微生物が開発される可能性がある。

①そう思う（29人=18%）、②そう思わない（87人=53%、正答）、③わからない（47人=29%）

◇設問2：セシウム137のガンマ線を大量に浴びた人に近づくと二次被ばくする。

①そう思う（27人=17%）、②そう思わない（98人=60%、正答）、③わからない（38人=23人）

◇設問3：人工放射線は有害だが、太古の昔からある自然放射線は有害性が少ない。

①そう思う（53人=33%）、②そう思わない（86人=52%、正答）、③わからない（24人=15%）

◇設問4：ホールボディ・カウンターは体内から出るガンマ線を測定する装置だ。

①そう思う（35人=21.5%、正答）、②そう思

わない（30人=18.5%）、③わからない（98人=60%）

◇設問5：セシウム137の半減期は30年なので、放射能が消えるには60年かかる。

①そう思う（19人=12%）、②そう思わない（119人=73%、正答）、③わからない（25人=15%）

◇設問6：甲状腺がんの原因になるヨウ素131は減衰して、すっかり消え失せた。

①そう思う（12人=7%、正答）、②そう思わない（117人=72%）、③わからない（34人=21%）

(²) 日本人の自然被曝線量は、地域・生活様式・居住環境などによって大きく変動するが、平均値については以下の資料を参照されたい。下道国・真田哲也・藤高和信・湊進「日本の自然放射線による線量」『Isotope News』No.706（2013年2月）

(³) 水爆実験の現場から約160km離れた海域にいた日本のマグロ延縄漁船「第五福竜丸」が強い放射性降下物にさらされ23人の乗組員が被曝、半年後の1954年9月23日、無線長の久保山愛吉氏が死亡したこともあり、この被災事件は日本では「第五福竜丸事件」として知られている。詳細は、安斎育郎監修・ビキニ水爆被災事件静岡県調査研究会編集『ビキニ水爆被災事件の真相—第五福竜丸ものがたり』（かもがわ出版）2014年参照。

放射性廃棄物の保管について¹

岡屋 克則^{2*}

Storage of Radiation Waste

Katsunori OKAYA

School of Engineering, The University of Tokyo

Abstract

Many years and new technical development are required to dispose of the nuclear waste, which is a by-product of nuclear development. This report investigates and summarizes the history of nuclear development, the situation of nuclear waste, and the processing concept of nuclear waste. The data of a previous accidents (many depend on man's mistake) are examined in order to indicate especially the danger of a nuclear facility. Moreover, reference is made about the new technology, which includes future technical research about a nuclear waste disposal method.

1. 緒 言

人類はエネルギー資源を手に入れるたびに急激に人口が増えたと言われている(Fig. 1)¹。石炭エネルギーの利用が進んだ17世紀半ばや核エネルギー利用の始まった20世紀半ば人口増加曲線の変曲点にある。しかし人口増加は単なるエネルギー問題ではなく、大規模な戦争の遺産とも言べきものではないだろうか。1650年頃はヨーロッパ全土を巻き込んだ30年戦争が終結し、中国でも明王朝が滅び長く続いた清王朝への移行時期である。大規模な戦争は多くの傷病者を出し、それに対する医療技術を急激に進化させる。同時に産業革命が進行し、それを下支えしたのが石炭エネルギーだった。同様に二次世界大戦においても医療を含む様々な新技術やデータが蓄積された。大戦後の技術革新も兵器開発に誘導されたものが少なくない。核開発も同様に大戦中の核兵器開発の意欲がなければ現在の核エネルギー時代の到来もかなり遅れたはずである。ダイナマイトを発明し膨大な富を築いたアルフレッド・ノーベルは、「可能な限りの最短時間でかつてないほど大勢の人間を殺害する方法を発見し、富を築いた人物が昨日、死亡した」という誤報記事(実際に亡くなったのは兄リュドヴィック)により死

後の評価を気にしてノーベル賞創設を遺言したと言われている²。初期の核開発に携わった科学者らも同様の道義的責任を負わされるとは思わなかったであろうし、困難な核廃棄物処分問題を予想できなかつたはずである。

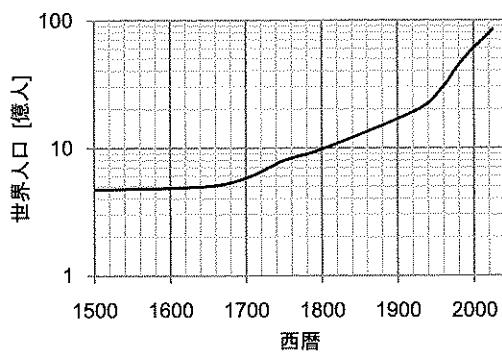


Fig. 1 The increase in world population



Fig. 2 Documentary film "Into Eternity"

1. 平成26年6月5日 本会第132回例会において発表

2. 国立大学法人 東京大学大学院 工学系研究科

* okaya@join.t.u-tokyo.ac.jp

平成26年4月15日受理

本報は、ドキュメンタリー映画「Into Eternity (邦題: 100,000年後の安全)」³(Fig. 2)に触発されて、核廃棄物処理技術の抱える問題と将来技術について検討したものである。この映画はフィンランドのオルキオトに建設中の放射性廃棄物の永久地層処分場であるオンカロについて客観的に報道されている。なお、筆者が原子力についての専門家ではないことに起因する検討不足の可能性があることを予めご容赦願いたい。

2. 放射性廃棄物

現在の主流である軽水型原子炉に投入されたウラン燃料は燃焼後にはTable 1に示すような成分が変化する⁴。木材や化石燃料（石炭、石油、天然ガス）の完全燃焼と異なり、ウラン燃料の僅か4%しか燃焼できないところが現在の原子炉技術の限界であることはあまり知られていない。この理由は核燃料の主成分であるウラン238が非核分裂性であるため、核分裂性のウラン235やプルトニウムの添加によって初めて核燃料として利用可能となる。つまり、核燃料は燃焼とともにウラン235が減少して燃焼状態を維持できなくなる。また、燃焼に伴って増加する核分裂性成分（核毒と呼ばれる）は燃焼維持に必要な中性子を吸収するため核燃料の燃えやすさを低下させる。

そこで使用済核燃料を再処理し、核毒を抽出除去して新たな燃料を製造することになる。すなわち核燃料は非核分裂性のウラン238が95%～97%であることが必要で、それ以上でもそれ以下でも安定した燃焼を維持できない。なお、コストの低いウラン238は核反応を穏やかにするばかりでなく、燃焼によって一部がウラン235に変わり新たな核燃料要素を生成している。すなわち、使用済核燃料の再処理はウラン燃料を有効利用する手段である。

ところが、アメリカでは使用済核燃料を再処理せず、そのままガラス固化し廃棄物として保管する方式（ワンスルーウェイ）をとっている。これは単に0.7円/kwhの再処理のためのコスト削減のみを意図しているわけではなく、再処理によって得られるプルトニウムの蓄積を避けるためである。プルトニウムは核爆弾の原料であるが、核燃料廃棄物のままのプルトニウム濃度では核兵

Table 1 Elements of nuclear fuel waste

成 分	燃焼前	燃焼後
ウラン 238	970kg	950kg
ウラン 235	30kg	10kg
プルトニウム		10kg
生成物 (内訳)		30kg
白金族		(2kg)
短半減期核分裂生成物 (SLFP)		(26kg)
(ストロンチウム (Sr)、セシウム (Cs) など高発熱量物質は10kg、直ちにガラス固化できる低発熱量物質は16kg)		
長半減期核分裂生成物 (LLFP)		(1.2kg)
(ヨウ素など半減期 7000年前後のもの)		
マイナーアクチノイド (MA)		(0.6kg)
(アメリシウム (Am)、ネプツニウム (Np)、キュリウム (Cm))		

器利用は困難である。そのため、アメリカ以外の国が高濃度プルトニウムを保有できないようにするため、自らがワンスルーウェイ方式をおこない、これを他国にも強要しようとする方針をとっている。ただし、ワンスルーウェイの核燃料廃棄物はプルトニウムなどの濃度が低いために放射線量は低いが、マイナーアクチノイド(MA)など半減期の長い成分が多いので無害化には長い年月を要する。

核燃料の燃焼による生成物の大部分は短半減期核分裂生成物 (SLFP) であって、ストロンチウム(Sr)やセシウム(Sc)もその一部である。その他、ヨウ素など半減期 7000 年前後の成分である長半減期核分裂生成物 (LLFP) の他にマイナーアクチノイド(MA)が生成される。MA は超長半減期核分裂生成物であり、アメリシウム (Am)、ネプツニウム (Np)、キュリウム (Cm)などであり、核燃料にとって濃度が高すぎれば燃焼を不安定化させる。

Table 2 に主な放射性物質の半減期を示す⁵。周知のように半減期は放射線量が半減するまでの期間をいうものであって、放射性物質が人類あるいは生物にとって十分に無害化されるまでの期間を表すものではない。その意味では、核燃料廃棄物が完全に再処理なしに無害化されることはないと言ふべきであろう。

放射性物質の半減期はミリセカンドオーダーのものからウラン238のように44.8億年のものまである。この時間レベルの幅はせいぜい100年足らずの寿命である人間の時間単位をはるかに凌駕する。Table 3 に地球と人類の歴史をまとめたみた^{6,7,8}。

Table 2 List of main radioactive isotopes by half-life

同位体元素	記号	半減期
ヨウ素 132	¹³² I	2 時間
ランタン 140	¹⁴⁰ Ra	48 時間
イットリウム 90	⁹⁰ Y	64 時間
モリブデン 99	⁹⁹ Mo	66 時間
テルル 132	¹³² Te	3 日
キセノン 133	¹³³ Xe	5 日
ヨウ素 131	¹³¹ I	8 日
ゼンツム 136	¹³⁶ Se	13 日
バリウム 140	¹⁴⁰ Ba	13 日
コバルト 58	⁵⁸ Co	71 日
ルテニウム 106	¹⁰⁶ Ru	370 日
セシウム 134	¹³⁴ Cs	2 年
コバルト 60	⁶⁰ Co	5 年
クリプトン 85	⁸⁵ Kr	11 年
ストロンチウム 90	⁹⁰ Sr	29 年
セシウム 137	¹³⁷ Sc	30 年
アメリシウム 242	²⁴² Am	141 年
アメリシウム 241	²⁴¹ Am	432 年
アメリシウム 243	²⁴³ Am	7370 年
キュリウム 245	²⁴⁵ Cm	8500 年
キュリウム 250	²⁵⁰ Cm	9000 年
プルトニウム 239	²³⁹ Pu	2.4 万年
キュリウム 248	²⁴⁸ Cm	3.4 万年
ネプツニウム 236	²³⁷ Np	15.4 万年
ネプツニウム 237	²³⁷ Np	214 万年
キュリウム 247	²⁴⁷ Cm	1560 万年
ウラン 235	²³⁵ U	7 億年
ウラン 238	²³⁸ U	44.8 億年

Table 3 History of the earth and human beings

年代	事象
138 億年前	ビッグバン
45 億年前	地球誕生（45 億年前の溶岩をカナダヒグリーンランド西部で発見）
40 億年前	原始海洋発花崗岩（カナダ北部のアカスタ片麻岩）
35 億年前	最古のバクテリア化石（西オーストラリア・ピルパラ地域）
25 億年前	嫌気性生物の絶滅、好気性生物の台頭（大気中の酸素の増加）
20 億年前	ヌーハ大陸出現（大陸移動説）
8 億年前	氷河時代（Snowball Earth 仮説）
5.3 億万年前	生物の多様化と脊椎動物の出現（カンブリア爆発）
4 億年前	アンモナイト
3.5 億年前	氷河時代（カルー氷期）
3 億年前	昆虫拡大、爬虫類出現
2.5 億年前	生物大量絶滅（メタンハイドレートの大量気化により全生物種の 90% - 95% が絶滅）
1.5 億年前	鳥類の出現（始祖鳥）
1 億年前	恐竜全盛
6550 万年前	恐竜、アンモナイト絶滅（隕石落下による環境激変が原因か）

4500 万年前	ヒマラヤ山脈（インド亜大陸が北上しユーラシア大陸に衝突）
2500 万年前	最古の類人猿（アフリカ・ケニヤ）
世界各地に類人猿拡散	（ヨーロッパ、南アジア、東アジアなどユーラシア各地に化石）
1300 万年前	最古の人類化石（中央アフリカ、サヘラントロップス・チャデンシス）
700 万年前	アウストラロピテクス（道具使用）
250 万年前	エレクトス原人（石器使用）
78 万年前	地磁気の逆転（前回は 250 万年前）
50 万年前	北京原人
40 万年前	マンモス（北東シベリア）
23 万年前	ネアンデルタール人（アフリカ）
20 万年前	ホモ・サピエンス（現在のヒト）
13 万年前	温暖期ピーク（現在よりも温暖）
10 万年前	現代人拡散（アフリカ単一起源説、ホモ・サピエンスが世界各地に）
5 万年前	クロマニヨン人
ショーヴェ洞窟壁画（南仏）	
3 万年前	ラスコー（1.8 万年前）、アルタミラ（1.4 万年前）など
日本列島が大陸と完全分離	（宗谷海峡が海平面下に没し、対馬暖流が日本海に流入）
1.3 万年前	氷期終了
前 8800 年	最古の銅製品（イラク、人類が最初に精錬した金属）
前 3000 年	初期の文明（古代エジプト文明、メソポタミア文明など）
紀元前後	古代帝国（古代ローマ、漢など）
18 世紀後半	産業革命（エネルギーの大量消費時代到来）
20 世紀	人口の爆発的増加（科学技術の発達、世界大戦、環境破壊、地球温暖化や資源枯渇懸念）
1866 年	ダイナマイト発明（ノーベル）
1895 年	放射線の発見（レントゲン）
1896 年	ウラン鉱石の放射線（ベクレル）
1898 年	ラジウムの α 線（キュリー夫人）
1932 年	中性子、陽電子、重水素発見
1939 年	核分裂現象の発見（ボーアの予測）
1942 年	世界初の臨界実験（フェルミ）
1945 年	原子爆弾開発
1951 年	原子炉による発電実験（アメリカ）
1953 年	商用原子力発電開始（イギリス）
1966 年	日本で原子力発電開始（東海原発）
1979 年	スリーマイル島原発事故（米国）
1979 年	スウェーデンが原子力撤廃決定
1986 年	チェルノブイリ原発事故（旧ソ）
1990 年半ば	欧州主要国が高速増殖炉開発断念
1999 年	東海村 JCO 臨海事故（日本）
2000 年	ドイツが原子力を撤廃決定
2001 年	アメリカが原発推進に転換
2005 年	フランスが日本との高速増殖炉の共同利用提案
2011 年	福島原発事故

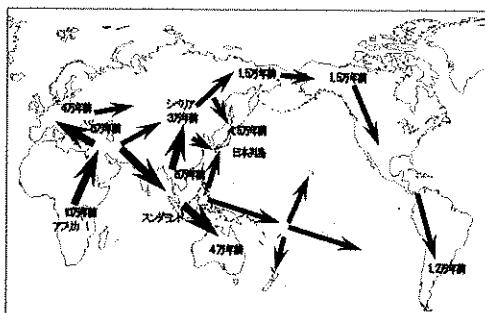


Fig. 3 Global expansion of *Homo sapiens*

Fig. 3 にはホモ・サピエンスが地球上に展開していった年代を示す⁹。長く見積もっても人類が登場してからわずか 10 億年しか経過していない現在、10 億年もしくはそれ以上先の放射性廃棄物の処理問題を考えなければならないのだから、人類にとって極めて負担の重い課題であると言える。

3. 核開発の歴史と事故

ここでは核燃料廃棄物の処理方法を検討する前にこれまでの核開発の歴史を振り返りたい。核実験についてのデータはあまりにも膨大で紙面の都合で割愛する。アメリカは少なくとも 319 回の地上、洋上核実験と 723 回の地下核実験をおこなっている。(この回数には不発回数は含まれていない。)ソ連は少なくとも 715 回の核実験を実施、イギリス 12 回、フランス 210 回、中国 45 回(ロプノール)、インド 2 回、パキスタン 1 回、北朝鮮 4 回、南アフリカ・イスラエルの共同実験 1 回などがある。

Table 4 および Table 5 に示すのはこれまでに発生した原子力関係の事故である¹⁰。Table 4 では原子力発電所についての事故であり、これ以外にも公開されていないもののが多数あるものと推測される。また、Table 5 には原子力発電所以外の事故であり、その多くは原子力潜水艦関係である。これらの情報は軍事機密であって容易に公開されるものではないが、ソ連崩壊時に情報公開されたものおよびアメリカの 30 年期限切れ情報公開によるものである。日本では軍事的機密性は主張されないが、現場での事故隠蔽体質が多く、かなり時間を経てからの事情聴取による発覚や内部告発によるものが目立っている。事故原因の多くは見積の甘さなどによる設計上のミスよりもオペレータの知識不足などによる操作ミスが多い。中にはブラジルの事故のように盗難にあった

放射性物質が知識のない民間人の間で蛍光剤を光らせる珍しいものとして流通し被曝死亡事故に至ったケースもある。原子力発電所の3大事故であるスリーマイル原発事故とチエルノブリ原発事故もいずれもオペレータの判断ミスによるものである。無論、それらの背後には設備の安全対策の不備があり、今回の福島第一原発事故にも安全対策の不十分さが指摘されている。機器は故障するもの、人は間違えるものという前提を無視して、機器は全て順調に機能しオペレータは間違いを犯さずに完璧な操作をするものとして安全性を謳うなら、明らかにこれは誤りである。

4. 放射性廃棄物の処分方法

資源エネルギー庁のホームページには核燃料廃棄物方法についての記述がある¹¹。宇宙投棄についてはロケットの打ち上げ失敗が懸念され、氷床処分については南極条約で禁止されているほか氷床特性が不明であるばかりでなく日本には氷床そのものがない。無論海外への核廃棄物移動も禁じられている日本では氷床処分は現実性がない。これまでに旧ソ連をはじめ多くの国々がおこなってきた海洋投棄もロンドン条約によって禁止されていることから、日本では地底に埋設する地層処分しか道はない、それまでは地表上で人間が監視を続ける長期管理方式しかない。

資源エネルギー庁が考える地層処分は Fig. 4 に示すような地下 200m 程度の地下にキャニスターに入れた高レベル放射性廃棄物のガラス固溶体を埋設するものである。このような日本の地層処分方式は、かつての鉱山の廃坑を利用すれば容易であるようにも思える。それに比べてフィンランドのオンカラでは、核廃棄物処分のために新たに地下 420m まで坑道を掘り(Fig. 5)、そこに 100 年分の核燃料廃棄物を置こうとするものであり、膨大な費用と年月を要する¹²。

ここで問題なのが、フィンランドと日本の地盤の安定性である。周知のように地震大国である日本は極めて地盤が不安定であることを指摘されている。一方でフィンランドは活断層もなく地盤が安定しており、花崗岩の固まりであるオルキオト周辺では長期にわたる安定性が保証されているとも言える。また、ドイツのゴアレー・ベン岩塩層も日本と異なり地震もなく安定した地層と言われてきたが、ボーリングによる地表水の流入や核燃料の発熱による岩塩の溶解で将来性が危ぶまれている¹³。

Table 4 Nuclear and radiation accidents (relevant to a nuclear power plant)

発生日	事故発生	事故事象	備考	レベル
1952/12/12	チョーク・リバー研究所 (カナダ)	放射性物質漏れ	操作ミスで制御棒が引き抜かれた	5
1957/9/29	ウラル核惨事 (旧ソ連)	放射性物質飛散	放射性物質の大量貯蔵に伴う冷却不能事故、プルトニウムを含む 200 万キュリーの放射性物質が飛散	6
1957/10/10	ワインズケール原子炉 (イギリス)	放射性物質放出	黒鉛（炭素製）減速材の過熱により火災 数十人が白血病で死亡	?
1959/7/13	サンタスザーナ野外実験所 (アメリカ)	放射性物質放出	ナトリウム冷却原子炉の燃料棒が溶融 ヨウ素、セシウム放出、情報隠匿	?
1961/1/3	原子炉容器 SL-1 (アメリカ)	原子炉暴走	制御棒を運転員が誤って引き抜いた 3名死亡、遺体高度汚染	?
1966/10/5	エンリコ・フェルミ 1 号炉 (アメリカ)	炉心溶融	高速増殖炉の事故	?
1963/10	サン・ローラン・デ・ゾー原子力発電所 (フランス)	燃料溶融		?
1969/1/21	リュサン研究用原子炉 (スイス)	炉心燃料溶融	冷却材喪失	?
1973/11	バーモントヤンキー原発 (アメリカ)	炉心の一部臨界	検査のため抜いた状態だった制御棒の隣の制御棒を誤って抜いた	?
1973/3	美浜発電所一号炉 (日本、関西電力)	燃料棒破損	事故隠匿	1
1975/12/7	グレイフィスパルド原発 (西ドイツ)	火災事故	電気系の故障により出火、5 系統の冷却ポンプ損傷	3
1976/1/5	ヤスロフスキ原発 (チェコスロバキア)	燃料棒放出	燃料棒交換中の事故、死者 2 名	4
1976/11	ミルストン原発 1 号機 (アメリカ)	臨界事故	炉心スクラムで停止	?
1977/2/22	ヤスロフスキ原発 (チェコスロバキア)	放射性物質放出	反応容器の腐食により、放射性物質流出	4
1978/11/2	福島第一原子力発電所 3 号機 (日本、東京電力)	臨界事故	戻り弁の操作ミスで制御棒 5 本が抜けた、構造上の欠陥 情報隠匿→繰り返し発生 (他に 6 件)	3
1979/3/28	スリーマイル島原子力発電所 (アメリカ、ペンシルバニア)	炉心溶融	不完全な設備保全、制御盤配置の不備、制御室運転員の誤判断等が重なって発生	5
1981/1/10	敦賀原発第 1 号炉 (日本、関西電力)	冷却水漏れ	事故隠匿	?
1981/3/8	敦賀原発第 1 号炉 (日本、関西電力)	放射性廃液流出	廃液大量流出	?
1984/9/15	アゼンス原発 (アメリカ、アラバマ)	緊急停止	安全基準違反とオペレーションミスにより 6 年停止命令	?
1985/3/9	アゼンス原発 (アメリカ、アラバマ)	緊急停止	原発起動時の計装不調	?
1986/4/11	ビルグリム原発 (アメリカ、マサチューセッツ)	緊急停止	計装不調	?
1986/4/26	チェルノブイリ原子力発電所 (ロシア)	原子炉暴走・爆発	実験中の操作ミス、直接死数十人→9000 人、処理作業員 5 万 5000 人が死亡、98 万 5000 人が癌になったとも言われている	7
1986/5/4	ハムウェントロップ試験機 (ドイツ)	放射性物質放出	試験機からの放射性物質流出	?
1987/3/31	デルタ原発 (アメリカ、ペンシルバニア)	緊急停止	冷却不全によりスクラム	?
1987/7	オスカーシャム原発 3 号機 (スウェーデン)	臨界事故	制御棒の効果を調べる試験中に制御棒を抜いていたところ想定外の臨界状態	?
1989/3/17	ラズビー原発 (アメリカ、メリーランド)	緊急停止	圧力配管に亀裂検出	?
1989/12/19	リカミング原発 (アメリカ、ニューヨーク州)	緊急停止	計装不調	?

1989/1/1	福島第二原子力発電所 3号機 (日本、東京電力)	金属流出	原子炉再循環ポンプ内部が壊れ、炉心に多量の金属粉が流出した	2
1990/9/9	福島第一原子力発電所 3号機 (日本、東京電力)	自動停止	主蒸気隔離弁を止めるピンが壊れた結果、原子炉圧力が上昇	2
1991/2/9	関西電力美浜発電所 2号機 (日本、関西電力)	非常用炉心冷却装置作動	蒸気発生器の伝熱細管が破断し、55トンの一次冷却水が漏洩	2
1991/4/4	浜岡原子力発電所 3号機 (日本、中部電力)	自動停止	誤信号により原子炉給水量が減少	2
1991/5/31	浜岡原子力発電所 3号機 (日本、中部電力)	臨界事故	制御棒が3本抜けた、情報隠蔽	3
1992/3	ソスノビーポル原発 (ロシア)	放射性ガス放出	燃料チャンネル破裂	?
1993/4/6	トムスク-7再処理コンビナート (ロシア)	放射性ガス放出	硝酸での清掃時にタンクが爆発	4
1995/12/8	高速増殖炉もんじゅ (日本、動力炉・核燃料開発事業団)	ナトリウム漏洩・燃焼	2次主冷却系の温度計の鞘が折れた、事故隠蔽	1
1996/2/20	ウォーターフォード原発 (アメリカ、コネチカット)	緊急停止	リーグバルブ故障で停止、その後多数の問題点が見つかる	?
1996/12/2	クリスタル・リバー原発 (アメリカ、フロリダ)	緊急停止	制御系故障で停止、その後大改修	?
1997/3/11	東海再処理施設 (日本、動力炉・核燃料開発事業団)	火災爆発	低レベル放射性物質をアスファルト固化する施設で火災発生、爆発	3
1998/2/22	福島第一原子力発電所 4号機 (日本、東京電力)	制御棒抜け	34本の制御棒が約15cm抜けた	1
1999/6/18	志賀原子力発電所 1号機 (日本、北陸電力)	無制御臨界事故	弁操作の誤りで炉内の圧力が上昇し3本の制御棒が抜けた、スクラム動作せず、マニュアルミス、窒素充填忘れ、事故隠蔽	3
1999/9/30	東海村 JCO 核燃料加工施設 (日本)	臨界事故	ウラン化合物の粉末を溶解する工程の手抜き、作業員2名死亡、667名被曝	4
1999/12/27	ルブレイエ原子力発電所 (フランス)	全電源喪失	大嵐のため洪水が発生し、外部電源系が全部停止	?
2002/2/16	オークハーバー原発 (アメリカ、オハイオ)	緊急停止	制御棒の腐食	3
2004/8/9	美浜発原子力電所 3号機 (日本、関西電力)	2次系配管破損	配管破損により高温高圧の水蒸気が大量に噴出、作業員5名死亡	0+
2006/7/25	フォルスマルク原発 (スウェーデン、東京電力)	緊急停止	電気系統の故障	2
2007/7/16	柏崎刈羽原子力発電所 (日本、東京電力)	火災、放射性物質の漏洩	新潟県中越沖地震により外部電源用の油冷式変圧器が火災、核燃料棒プールの冷却水が一部流失	0-
2008/7/7	トリカスタン原子力発電所 (フランス)	ウラニウム流出	メンテナンス中にウラン溶液貯蔵タンクからウラン溶液約3万リットルが溢れ出した	0?
2010/8/26	高速増殖炉もんじゅ (日本、動力炉・核燃料開発事業団)	炉内中継装置落下	2011年6月24日引き抜き完了	?
2010/6/17	福島第一原子力発電所 2号炉 (日本、東京電力)	緊急自動停止	制御板補修工事のミスで冷却ファン停止	1
2011/3/11	福島第一原子力発電所 (日本、東京電力)	炉心溶融	非常用電源の故障で緊急炉心冷却システムも作動せず	7
2011/3/11	福島第二原子力発電所 (日本、東京電力)	冷却機能停止	地震と津波により外部電源停止	3
2011/9/12	マルコー原発 (フランス)	爆発事故	金属廃棄物の溶解炉で爆発、1人死亡	?
2013/4/11	ビルグリム原発 (アメリカ、マサチューセッツ)	緊急停止	猛吹雪によって外部電源喪失	?
2013/5/23	J-PARC ハドロン実験施設 (日本、東京電力)	放射性同位体が管理区域外漏洩	装置の誤作動、人為的な排気操作	1

Table 5 Nuclear and radiation accidents (other than a nuclear power plant)

発生日	事故発生	事故事象	備考
1945/4/6	クロスロード作戦 (アメリカ)	臨界事故	プルトニウムコアの臨界事故で2名死亡
1954/3/1	キャッスル作戦 (アメリカ)	民間人被曝	第五福竜丸事件
1961/7/4	ホーテル級原潜「K-19」 (旧ソ連)	一次冷却水漏れ	修理中の作業ミス、8名死亡、その後乗組員の半数死亡
1961/10/11	バスター・ジャングル作戦 (アメリカ)	兵員被曝	6500名の兵員が被曝(故意)
1963/4/10	バーミット級原潜「スレッシヤー」 (アメリカ)	沈没	大西洋ニューイングランド沖、129名死亡
1965/2	原子力砕氷艦「レーニン」 (旧ソ連)	原子炉暴走	冷却水喪失、死者多数、原子炉は2年後に北極海へ投棄
1965/5/22	スキップジャック級原潜「スコープオン」 (アメリカ)	沈没	核兵器2個搭載、99名死亡
1966/1/17	B-52G 戦略爆撃機(アメリカ)	墜落	4個の水爆落下、2個の水爆の起爆装置が地上で爆発、放射能汚染
1968/3/8	ゴルフ型潜水艦 K-129 (旧ソ連)	沈没	核ミサイル3発搭載
1968/5	ノヴェンバーグ級原子力潜水艦 (旧ソ連)	液体金属漏洩	9名死亡、燃料の20%損傷
1969/11/15	ホテル級原子力潜水艦 K-19 (旧ソ連)	衝突事故	バレンツ海で米潜水艦ガトーと衝突
1970/4/11	ベンバー級 K-8 (旧ソ連)	沈没	ビスケー湾、52名死亡
1970/6/	エコー2型原子力潜水艦(旧ソ連)	沈没	米「トートグ」と衝突
1971/3/	ソ連原子力潜水艦 (旧ソ連)	衝突	ソ連沿岸で米ソ原潜が衝突、詳細不明
1972/2/24	ホテル級原子力潜水艦 K-19 (旧ソ連)	火災	ニューファンドランド沖、28名死亡
1974/5	ソ連原子力潜水艦 (旧ソ連)	衝突	ソ連沿岸で米ソ原潜が正面衝突
1974/9/1	原子力船「むつ」(日本)	放射線漏れ	
1978/1/24	海洋偵察衛星「コスマス 954」 (旧ソ連)	放射性破片飛散	原子炉搭載、カナダに墜落、賠償問題
1979/7	ソ連原子力潜水艦 (旧ソ連)	冷却水漏れ	太平洋
1981/8	エコー1型原子力潜水艦(旧ソ連)	火災	沖縄沖、9名死亡
1983	チャーリー1型原子力潜水艦 (旧ソ連)	原子炉室浸水	16名死亡
1985/8/10	エコー2型原子力潜水艦 K-431 (旧ソ連)	原子炉爆発	原子炉の誤操作、10名即死、290名被曝
1985/12	ソ連原子力潜水艦 (旧ソ連)	炉心溶融	ウラジオストック近郊
1986 夏	エコーII級原子力潜水艦 (旧ソ連)	冷却不全	一次冷却回路に別の元素が混入?
1986 夏	ヴィクター級原子力潜水艦 (旧ソ連)	炉心溶融	
1986/10/9	ヤンキー級原子力潜水艦 K-219 (旧ソ連)	火災、沈没	バミューダ諸島沖、核弾頭34基搭載
1987/9	ゴイアニア(ブラジル)	放射能汚染、被曝	閉鎖された病院に放置されていた放射線療法用の医療機器から放射線源が盗難、4人死亡
1989/4	マイク級原子力潜水艦 K-278 (旧ソ連)	火災、沈没	ノルウェー沖、核弾頭2基海没
1994/3/30	リュビ級原潜「トゥーロン」 (フランス)	水蒸気爆発	10名死亡
2000/8	オスカーII型原子力潜水艦 K-141 (ロシア)	沈没	バレンツ海、118名全員死亡
2011/12/29	デルタ級原子力潜水艦 K-84 (ロシア)	火災	SLBM(潜水艦発射弾道ミサイル)搭載 第2のチェルノブイリ危機

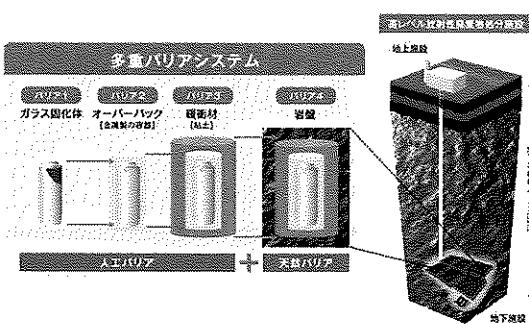


Fig. 4 The preservation system of high-level radioactive wastes

それでは日本には核廃棄物処分にどのような道が残されているのかと言えば、軌道エレベーターによる宇宙処分¹⁴といった夢のような話ではなく、海底地層処分を提案したい。日本の東側には日本が乗っている北アメリカプレート(千島プレート)に向かって太平洋プレートが毎年 10cm の速度でせまってきている。そこに日本海溝が生じ 8000m もの深さがある。この日本海溝の底は太平洋プレートとともに地中マグマに向かってゆっくりと潜り込んでいる。ここに核廃棄物のキャニスターを運びこむことは、海底資源を採取して洋上まで浮上するよりもはるかに容易である。できるならば、日本海溝の太平洋プレート側に穴を穿ち、そこにキャニスターを埋設すれば、安全性が格段と増すと同時に単なる海洋投棄ではない海底地層処分としてロンドン条約の拘束を避けることができるのではないだろうか。

5. 最後に

オンカロでは 10 万年の人類もしくは人類に代わる知的生命体へどのように危険性を知らせるかと言う点が問題となっている。あらゆる情報媒体が長い歳月を乗り越えられず、唯一岩に刻まれたメッセージのみが残されるであろう。

だが、人類が原子炉を最終処分する前に地上から姿を消したとすると、地上に残された廃棄物はどうなるのだろうか。

Reference

- 「世界人口白書 2011」より
<http://www.unfpa.or.jp/cmsdesigner/data/entry/publications/publications.00031.00000005.pdf>

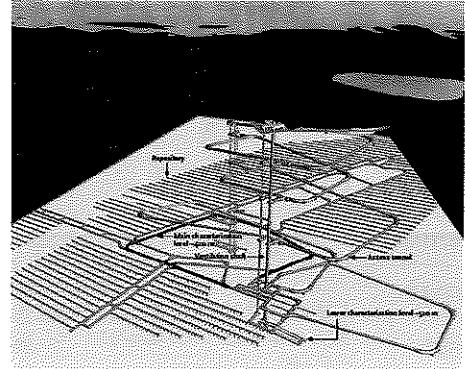


Fig. 5 Diagrammatic plan of ONKARO

2. Alfred Nobel (Wikipedia)
http://en.wikipedia.org/wiki/Alfred_Nobel
3. 映画「100,000 年後の安全」公式サイト
<http://www.uplink.co.jp/100000/>
4. 放射性廃棄物（ウィキペディア）
<http://ja.wikipedia.org/wiki/放射性廃棄物>
5. 半減期（ウィキペディア）
<http://ja.wikipedia.org/wiki/半減期>
6. 地球史年表（ウィキペディア）
<http://ja.wikipedia.org/wiki/地球史年表>
7. 原子力発電（ウィキペディア）
<http://ja.wikipedia.org/wiki/原子力発電>
8. 原子力発電の歴史（神戸大学環境サークル）
<http://www.geocities.jp/ecoro2005/houkoku/contents/060217atomichistory.html>
9. ホモ・サピエンスの世界進出（国立科学博物館）
<http://www.kahaku.go.jp/special/past/japanese/index/1/1-14.html#>
10. 原子力事故（ウィキペディア）
<http://ja.wikipedia.org/wiki/原子力事故>
11. 放射性廃棄物のホームページ（資源エネルギー庁）
<http://www.enecho.meti.go.jp/rw/hlw/hlw01.html>
12. ONKARO: Underground Rock Characterisation Facility at Olkiluoto, Eurajoki, Finland
http://www.posiva.fi/files/375/Onkalo_ENG_2903_06_kevyt.pdf
13. 何處にも存在しない安全な最終処分場 関口博之
<http://www.asyura2.com/12/genpatu22/msg/147.html>
14. 軌道エレベーター豆知識
<http://blog.goo.ne.jp/orbitalelevator/c/88c2b74260ea73b8335c15b5d9f87b39>

ガス事業における数値解析技術の開発と活用¹西村 浩一^{2*}

Development and Application of Numerical Simulation in Gas Industry

Koichi NISHIMURA

Energy Technology Laboratories, Osaka Gas Co., Ltd.

Abstract

エネルギー事業者の技術開発現場では、流体力学や材料力学は様々な場面で活用されるため、基礎となる技術として位置づけられる。特に近年の計算機環境の向上により、数値解析技術が広く用いられている。中でも数値流体力学は、機器の開発から各種のエンジニアリングに至るまで、ガス事業では幅広く活用されている。その事例の一つとして、建物近傍における瞬間的な濃度予測について、風洞実験による基礎データの取得および数値計算手法の開発を紹介する。風洞実験結果から、濃度変動の確率密度関数が対数正規分布に従う場合が多いこと、濃度の間欠率が高い場合は対数正規分布から外れることが明らかになった。また、RANS モデルによるシミュレーションでは、モデル建物屋根面に排出口がある場合以外では、濃度の標準偏差分布が予測できることが分かった。

Key words : Wind Tunnel Test, Computational Fluid Dynamics, RANS Model,
Instantaneous Concentration,

1. 緒言

資源の安定確保、環境適合性の向上、効率的な供給、高い安全性、便利で快適な暮らしの実現など、エネルギー事業者に対する要求は、より幅広く高度化しており、これらの要求に応えるために、技術開発が果たすべき役割はますます重要なものとなっている。

ガス事業における技術開発対象は、ガス製造や供給におけるエンジニアリングに関するものから、各種消費機器開発に至るまで多岐に渡る。これらの多様な技術開発において、流体力学や材料力学は、色々な場面で必要となるため、ガス事業者にとっては基礎技術と言える。特に流体力学に関する課題は多種多様なものがあるため、大阪ガスでは長年にわたり、技術開発と活用に取り組んできた。代表的な

ターゲット、計算機環境、使用コードなどを Fig.1 に示すが、本報告では、ガス事業における流体力学関連、特に数値シミュレーション技術の開発と活用について、建物近傍での瞬時高濃度予測の事例について報告する。

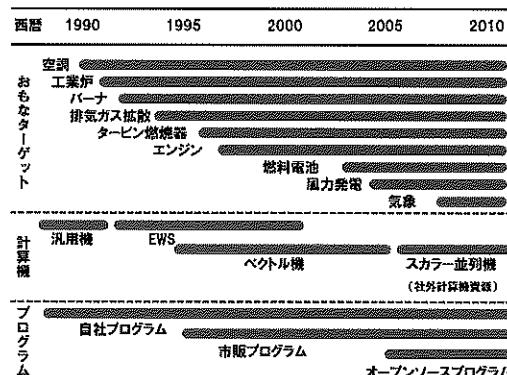


Fig.1 Chronological Table of CFD in Osaka Gas

- 平成 26 年 6 月 5 日 本会第 132 回例会において発表
- 大阪ガス株式会社 エネルギー技術研究所

* nishimur@osakagas.co.jp

平成 26 年 4 月 13 日受理

2. 建物近傍での瞬時高濃度の予測

燃焼排気や排熱、各種ガスの拡散など、ガス事業においては建物近傍の複雑な流れ場での拡散現象の予測が必要となる場合がある。そこで風洞実験に基づき、数値計算の検証を行い、建物近傍の複雑な流れ場における時間平均濃度予測技術を確立、活用を進めている¹⁾²⁾。その一方で、予測対象が臭気物質、毒性物質、可燃性物質などの場合は、時間平均値が問題のないレベルにあっても、瞬間的超過が問題となる可能性がある。そのためこれらの拡散を対象とする場合は、瞬時高濃度の評価が必要となる。そこで、建物近傍の複雑な拡散場を対象に、風洞実験により濃度の時系列データを取得しその特性を明らかにし、その特性に基づき、数値計算による予測方法の確立を行った。

2.1 風洞実験³⁾

風洞実験は、清水建設（株）技術研究所の回流型風洞（測定部 2.4 H × 2.6 W × 15.0 L m）で行った。建物モデルとしては辺長 $H=0.1$ m の立方体を用い、立方体屋上面中央に設けた排気口 ($D=0.01$ m) から、トレーサーガスとしてエタンを窒素で希釈し放出した。エタン濃度の測定には、水素炎イオン化検出式高速炭化水素計（Cambustion 社 HFR-400、応答時間 3ms）を用いた。サンプリングは 60 秒間行い、炭化水素計からの出力を 2ms の間隔で AD 変換し、3 万点のデータを採取した。測定した濃度 C ppm は、建物高 H m、建物モデル高さでの流速 U m/s、排出量 Q cc/sec により、 $C^*=CUH^2/Q$ と無次元化した濃度 C^* で取り扱う。風洞の上流側風速分布および乱流強度分布は、縮尺 1/400 の都市郊外に相当する大気境界層を設置した（べき指数 0.2）。風速は、建物モデル高さで $U=2.5$ m/s、排出速度は 1.15 m/s とした。また、モデル建物後方に排気口を設置したケースについても検討を行った。Fig.2 にモデル建物と排気口の

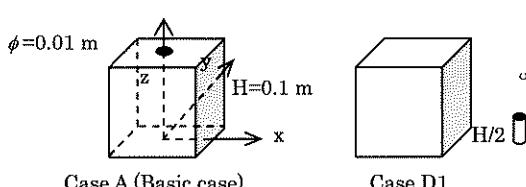


Fig.2 Model Buildings

概要を示す。

Fig.3 に屋根面中央排出口ケースの時間平均濃度分布図及び変動濃度の標準偏差分布を、Fig.4 に濃度の時系列データを示す。Fig.3 からトレーサーガスは、立方体後方の逆流域に巻き込まれて拡散すること、変動濃度の標準偏差は、屋上面後方で大きな値を取ることが見て取れる。また Fig.4 から、濃度には非常に激しい時間変動があること、計測位置により変動の仕方が異なることがわかる。すなわち、 $z/H=1/8$ の地面近傍ではでは、高濃度が瞬間に現れるものの比較的緩やかに変化する。対して $z/H=3/2$ の建物よりも高い部分では、間欠性が高く濃度がゼロとなっている時間が長い。Fig.5 に変動濃度のスペクトルを示す。 $z/H=3/2$ では 30~40Hz 程度にピークがあるが、 $z/H=1$ の屋上面後方や $z/H=1/8$ の地面近傍では 2~10Hz 付近がピークとなる。これは計測点に到達したトレーサーガスが、屋根面付近で発生する高周波の乱れの影響を主に受けで移流拡散してきたか、建物後流の比較的低周波の乱れの影響を受けたかによるものと考えられる。Fig.6 に屋上面およびモデル建物後方での確率密度関数を、Fig.7 に間欠率の分布（0 濃度の出現率）示す。Fig.6 の実線は、実験データの平均値と

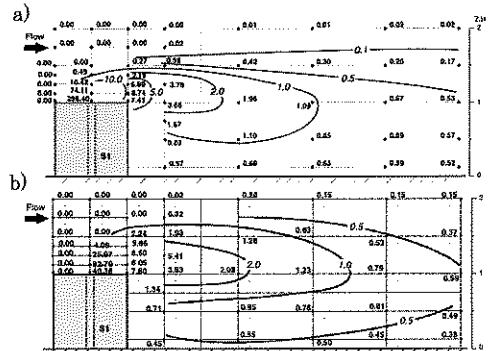


Fig.3 Contours of a) time averaged concentration and b) standard deviation of concentration in $y/H=0$ plane.

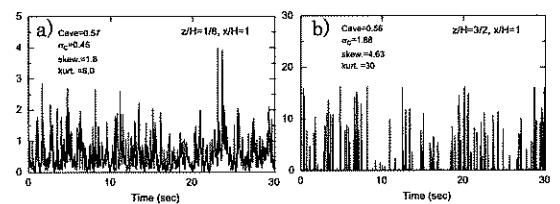


Fig.4 Time-series concentration at a) $x/H=1$, $y/H=0$, $z/H=1/8$, b) $x/H=1$, $y/H=0$, $z/H=1$.

標準偏差値による対数正規分布を示したものである。

Fig.6より、屋上面の各点ではほぼ対数正規分布に従うことが分かる。建物後流においても、モデル建物高さよりも低い $z/H=1$ や $z/H=1/8$ の点では、低濃度部以外では、概ね対数正規分布に従うが、 $z/H=3/2$ においては、対数正規分布から外れてくる。Fig.7中の点線枠は、間欠率

0.5以上の計測点を囲ったものである。対数正規分布から外れる上層部は、間欠率の高い部分に含まれる。以上のように風洞実験から、以下のことが明らかになった。
 ①濃度の間欠率が高い領域以外では、排気口位置や計測点位置に関わらず、時系列濃度の確率密度関数は、対数正規分布に従う。
 ②間欠率が高い領域については、対数正規分布からやや外れる。

2.2 数値計算⁴⁾

数値シミュレーションにより、複雑な流れ場での瞬間的な高濃度を予測する方法は、大きく二つに大別できる。ひとつはLES(Large Eddy Simulation)による方法で、もうひとつは時間平均型乱流モデル(RANS model: Reynolds Averaged Navier-Stokes model)による方法である。前者は、非定常解析により瞬間的な高濃度を得るもので、計算負荷は高く、上流境界条件の模擬方法や適切な統計処理方法などに課題がある。後者では、時間平均の濃度場と同時に、濃度の標準偏差分布を算出する。濃度変動の確率密度関数が定められれば、平均値と標準偏差値から瞬間的な高濃度を求めることができる。2.1の風洞実験結果から、濃度の間欠率の高い領域以外では、確率密度関数は概ね対数正規分布に従うことが分かった。そこで標準型 $k-\varepsilon$ モデルを乱流モデルに用い、濃度の時間平均値と標準偏差値を求めるシミュレーションを行い風洞実験データにより検証した。シミュレーションの基礎方程式は、ナビアストークスの式(レイノルズ平均)、連続の式、乱流エネルギー \bar{k} および散逸率 ε の輸送方程式、拡散物質の輸送方程式で、これに加えて1)式に示すSpaldingによる濃度の分散値 g (標準偏差の自乗)の輸送方程式を解いた⁵⁾。

$$\rho \frac{\partial g}{\partial t} + \rho \bar{u}_j \frac{\partial g}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_{eff}}{\sigma_g} \frac{\partial g}{\partial x_j} \right) + c_{g1} \mu_{eff} \left(\frac{\partial \bar{c}}{\partial x_j} \right)^2 - c_{g2} \rho g \frac{\varepsilon}{k} \quad 1)$$

$$g = (c - \bar{c})^2, \sigma_g = 0.7, c_{g1} = 2.8, c_{g2} = 1.92$$

各部の境界条件は既報に従った²⁾。空間差分は、各方程式の移流項は1次精度風上差分、その他は2次精度中心差分とした。ネスティングを行い立方体建物モデル廻りに細かいメッシュを配置し、最小メッシュ幅は、壁面および屋根面近傍で $H/40$ とした。以上の解析を、汎用コード(Star-CD)を利用して行った。Fig.8に時間平均

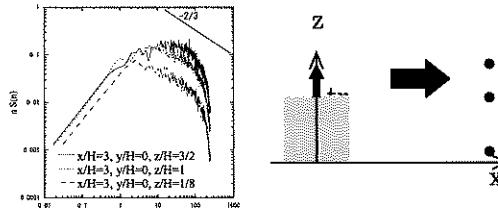


Fig.5 Spectrum of concentration (CaseA).

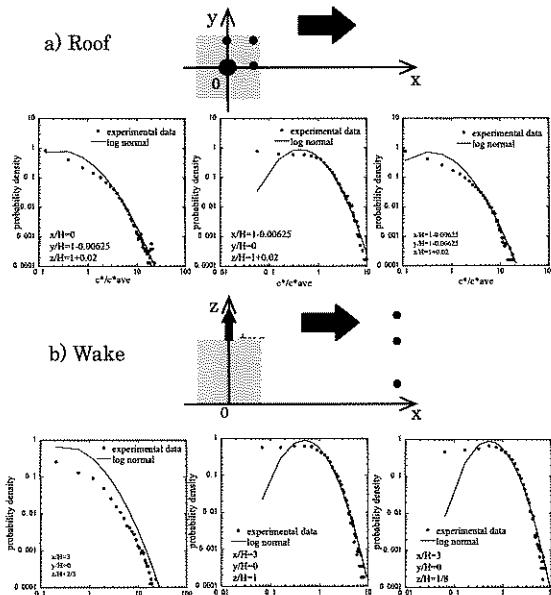


Fig.6 Probability density functions of concentration
a) on the roof and b) in the wake.

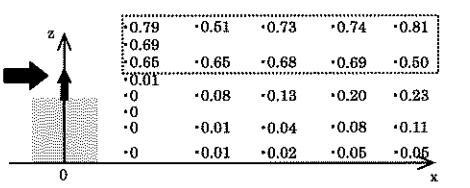


Fig.7 Distribution of intermittency in $y/H=0$ plane
(CaseA).

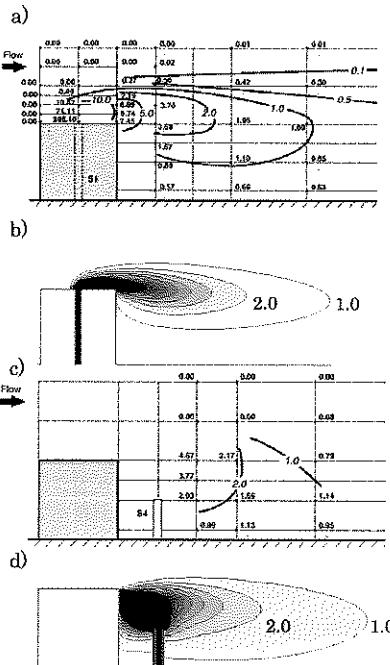


Fig.8 Contours of time averaged concentration a) wind tunnel test and b) simulation for Case A, c) wind tunnel test and d) simulation for Case D1.

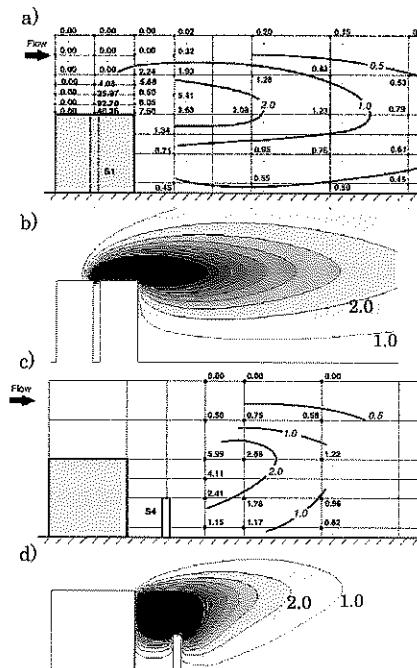


Fig.9 Contours of standard deviation of concentration a) wind tunnel test and b) simulation for Case A, c) wind tunnel test and d) simulation for Case D1.

濃度の空間分布を示す。Case A では、風洞実験に比べシミュレーションの方が後方まで高濃度が到達している。標準型 $k-\epsilon$ モデルでは屋上面前縁剥離の再現性が悪く、屋上面の逆流域を再現できないことが主因と考えられる。建物後流については、標準型 $k-\epsilon$ モデルは再付着点位置を後方に予測することが知られているが⁶⁾、Case D1 では、シミュレーション結果は風洞実験結果と良く一致した。Fig.9 に濃度の標準偏差の空間分布を示す。Case D1 では風洞実験結果とよく一致したが、Case A では実験値に対して 3 倍程度となった。Fig.10 にその他の排出源ケースの標準偏差検証結果を示す。屋上面の前端排出源ケース、後端排出源ケース、中央で煙突を取り付けた排出源ケースのいずれのケースでも、最大 2 倍程度、シミュレーションが標準偏差を過大評価している。屋根面に排出がある場合、Spalding のモデルでは標準偏差を過大評価する傾向があると言える。

2.1 で示したように、間欠率が高い領域以外では、濃

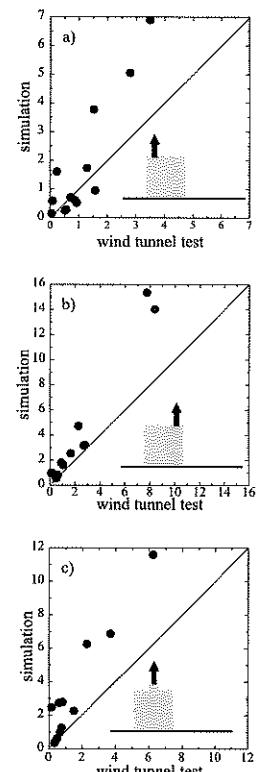


Fig.10 Relationship between standard deviation by simulation and wind tunnel test. a) Source at the front end of the roof, b) Source at the back end of the roof, c) Chimney stack source

度の確率密度関数は対数正規分布に従う。屋上面以外の排出源ケースでは、変動濃度の標準偏差が予測できるため、対数正規の確率密度関数を用いて、瞬間的な高濃度を予測することができる。

3. まとめ

エネルギー事業において活用される数値流体シミュレーションのうち、建物近傍の複雑な流れ場における物質拡散の、瞬間的な高濃度を予測する方法について、風洞実験による基礎データの取得とモデル検討について報告した。例会当日は、その他の事例についても紹介する予定である。

Reference

- 1) 老川進, 石原孟, 安田龍介, 西村浩一, 長谷実, 大気環境学会誌, 34(2), 123~136(1999)
- 2) 西村浩一, 安田龍介, 伊藤誠一, 大気環境学会誌, 34(2), 103~122(1999)
- 3) 西村浩一, 老川進, 日本機械学会第13回環境工学総合シンポジウム 2003 講演論文集, 350~351(2003)
- 4) 西村浩一, 老川進, 日本機械学会第13回環境工学総合シンポジウム 2003 講演論文集, 352~353(2003)
- 5) E.E.Khalil, D.B.Spalding and J.H.Whitelaw, Int. J. Heat Mass Trans., 18, 775~791(1975)
- 6) 環境工学委員会・空気環境小委員会・風環境数値計算 WG, 日本建築学会技術報告集 第12号, 119~124 (2001)

生物多様性依存の生態系サービス—概念と事例の紹介¹

杉村 乾^{2*}・松浦俊也³・滝久智³

Biodiversity-based ecosystem services – Principles and some case studies

Ken SUGIMURA, Toshiya MATSUURA, Hisatomo TAKI

Faculty of Environmental Studies, Nagasaki University

Department of Forest Management, Forestry and Forest Products Research Institute

Department of Forest Entomology, Forestry and Forest Products Research Institute

Abstract

Ecosystem services are welfare that ecosystems provide to the local society. The interrelation between biodiversity and ecosystem services is difficult to measure because biodiversity is not easy to perceive. In this paper I will introduce some case studies that have attempted to show that the ecosystem services are dependent on biodiversity. In western part of Fukushima Prefecture local people visited forests frequently and collected a great variety of species of plants, mushrooms, fish and wildlife throughout a year. There local people most frequently collected wild vegetables along streams that were disturbed by heavy snow fall and mushroom in old natural forests. The number of native honeybee and non-*Apis* insect pollinators visiting flowers was great, when a farmland was next to a large area of forests than a small area of them. Human disturbance would contribute to having higher ecosystem functions when forests are left with natural regeneration.

Key words: Environmental concern, resource use, recreation, pollination, rare species

1. はじめに

生物多様性 (Biodiversity) と生態系サービスという二つの言葉の歴史は新しい。それは、環境科学という用語で代表されるような、いわゆる「環境」というイメージが多くの人々に共有されるようになってきたことと

無縁ではないと推察される。Biodiversity は 1950 年代か、それより以前から使われていた Biological diversity (生物学的多様性) の短縮形である¹。それを使うことが初めて提唱されたのはかなり後、1985 年、その翌年の会合のタイトルに使うためであった²。これは生物多様性の危機を訴えるために開かれ、1992 年に国連環境開発会議 (地球サミット) で生物多様性条約が採択されるための大きな原動力を担った会合として知られている。生物多様性を訴るために書かれ、大きなインパクトを与えた最初の書物としては、「沈める箱船」³が挙げられる。これらのこと�이いかに短期間の間に起こってい

1. 平成 26 年 6 月 5 日日本会 132 会例会において発表
2. 長崎大学環境科学部

3. 森林総合研究所森林管理研究領域

*k-sugimura@nagasaki-u.ac.jp

平成 26 年 4 月 4 日受理

たかを見ると、生物多様性という用語が生まれたきっかけが世界的に急速に広がった危機感を背景としていたことがうかがわれる。

一方の生態系サービスについては、Ehrlich and Ehrlich⁴によって言葉が造られ、1997年、生態学者と環境経済学者が共同でまとめた「自然のサービス」⁵という書物で科学的に体系づけられた。人類は常に生態系から恩恵を受けてきたはずであるが、歴史や文明の長さに比べて、その重要性が世界規模で認識され始めたのはかなり最近のことであると言える。「自然のサービス」は先駆的かつ影響力のある仕事であるので、背景や特徴について少し紹介してみたい。まず、背景として以下の認識がある。一つには、生態系サービスの多くの部分が市場経済価値に反映されず、とくに経済のグローバル化によって、国や地域の政策の中で無視されることが多い。次に、地球規模での温室効果ガスによる気候変動、地域レベルでは土地利用の転換、異なる職業や地域住民の間での富や資源の移動、経済成長を上回る貧富の差の拡大などが急速になっていることによって、生態系が急速に変化している。これらの地球規模及び地域レベルの社会的変化によって生態系機能に与える影響が非可逆的になっているのではないかという危機感がある。そして、様々なバックグラウンドを持つ自然・社会学者が以下のような共通の感覚を持ち、緊急に訴えかけなければならないと認識したことである。共通の感覚とは、一つは文明の行く末に対する危機感。二つ目は社会が環境問題に直面したとき、様々な選択肢を前にして、理にかなう選択肢を取る術を持たないことが多いこと。三つ目として、人間生活を支える生態系の働きの重要性については膨大な情報が蓄積されているにもかかわらず、それらが的確に整理統合されておらず、政策決定者や一般市民に効果的に伝えられていないことである。

2. 生態系サービスの概念について

「生態系サービス」は人々が生態系から得ている恩恵を意味する。この言葉の中には、人と自然の結びつき、すなわち人間生活の基盤となる自然（生態系）と、その恩恵を受ける人間の側の立場が端的に表わされており、極めて適切な表現である。そして、時代の背景に適合した

Table 1 Classification of ecosystem services

Some examples of services that are provided by forest ecosystems	
Provisioning services	Providing timber, fire wood, clean water, non-timber forest products, medicinal plants, stream fish, genetic resources
Regulating services	Climatic regulation, controlling water cycling and flooding, pollination by forest animals, pest control
Cultural services	Providing opportunities for education, recreation and tourism, preserving cultural heritage and scenic beauty
Supporting services	Supporting the other services through production of organic substances by photosynthesis, nutrient and water cycling, soil formation

Developed based on Hassan et al.⁶

概念が、国連という影響力の大きい機関によって作られた「生態系サービスと人類の将来」⁶という計二冊、千五百ページ近くに及ぶ科学的な報告書で紹介されたことによって一気に広まった。これは単なるはやり言葉ではなく、幅広い分野の科学者達による多大な努力が基礎になっている。

生態系サービスは区分して見ると理解しやすい。よく用いられるのは、供給サービス Provisioning services、調整サービス Regulating services、文化的サービス Cultural services、基盤サービス Supporting services である（Table 1）。森林の管理では以前から多面的機能という概念が用いられていたが、両者はかなり似通っている。一つの大きな違いは多面的機能を支える基盤サービスが加わっていることである。これは、生産力や物質循環など、生態系機能の安定性や持続性が重視されていることを表している。次に、これまで多面的機能として木材生産や水土保全に重きを置く傾向があったのに対し、生物の働きに依存する部分のウェイトが相対的に高い。調整サービスとして、害虫制御やハナバチなどが花粉を媒介する送粉機能などが重視されているのがよい例である。さらに、市場経済に現れないものを評価しようとする、生態系サービスの体系づけに参加してきた環境経済学者の強い意図が反映されている。

3. 生態系サービスと生物多様性の関係

多様な生物が地球上あるいは身近に存在することを理解することは難しいことではない。しかし、生物多様性がどのように定義されているかを Fig. 1 にごく簡略的に示したが、概念としてとらえることは比較的容易であるとしても、実体として把握することが難しいことは明らかであろう。これが両者の関係を科学的に検証するところが難しいことの一つの所以である。それではどうすれば両者の関係を検証することができるのでしょうか。一つの方法は、明らかに単純な生態系とより多様な種で構成される生態系を比較するやり方である。たとえば、広い面積にわたって同時期に単一の種が植えられ、他の種の侵入を人為的に排除してきた林地（人工林）と、自然に再生し、多くの種が様々な時期に定着し、増殖してきた天然林の両者の間で生態系サービスを比較すれば、生物多様性と生態系サービスとの関係をある程度、推察することができる。

4. 事例研究

前述したように、単一の優占種からなる人工林と多種多様な動植物相で構成されている天然林を比較することによって生物多様性依存の生態系サービスの検証を試みた調査研究を紹介する。まず、杉村⁷は直接観察

と道路沿いの看板をもとに作成した簡便な指標を用いて文化サービスについて定量的な推定を試みた。そして、南会津、阿武隈、茨城南部において評価した結果、山菜・キノコ採り、トレッキング、渓流釣りなどの活動が見られたが、いずれも人工林に比べて天然林でより頻繁に観察された。また、インターネットの検索エンジンを用いて、ヒット件数を町村別に集計し、各市町村の人工林および天然林に関する統計値と対照させてみたところ⁸、山菜・キノコ採りのヒット件数は老齢天然林面積、積雪日数などと有意な相関が得られた。さらに既往の文献をもとに全国的にみると、生物多様性に依存する生態系サービスという観点から、(A)特用林産物の採取と渓流釣りがさかんな北海道、東北及び北陸地方、(B)人工林率が高い西南日本、(C)レクリエーション利用頻度がとくに高い関東から北九州にかけての都市近郊域、(D)天然林が卓越し、固有種が多い最南部の島嶼域、という4つの区域がおおまかに抽出される⁹。各区域での森林の価値としては、A区域では山菜・キノコ採りのほか、釣り、トレッキング、ドライブなど、多様な利用が見られたのに対し、B区域では利用頻度が低いだけでなく、生物多様性との関連の小さい利用が多い。また、C区域では利用頻度が相対的に高く、天然林でのレクリエーション利用の割合が大半を占める。D区域ではエコツーリズムの割合が高く、自然保護の重要性も確認された⁷。

次に、天然林が9割以上を占める南会津地域で、山へよく出かける世帯が多い区域においてアンケート調査

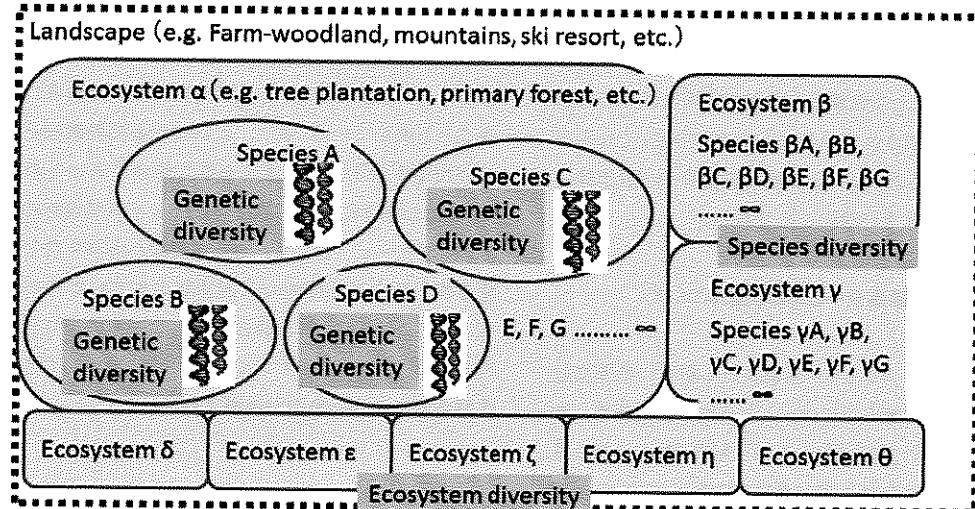


Fig. 1 The concept of biodiversity that is composed of genetic, species and ecosystem diversity

を行った。その結果、(a)収穫物を得るために頻繁に山に出かける世帯の割合は8割弱から9割と高く、収穫物が日常の食材や民宿経営にもたらす量的貢献が大きいこと、(b)山に行く目的は多い方から山菜、キノコ採り、渓流魚・山椒魚獲り、狩猟の順となり、出かける時期は雪解け後の春から夏に山菜と渓流魚・山椒魚、秋にキノコ、晩秋から雪解けまでの積雪期に狩猟というように、年間を通じて地元住民により森林が多面的に利用されていることを示していた¹⁰。山菜について、種ごとの採取地の分布特徴を調べると、種によって採取場所に大きな差が見られたが、雪崩や渓畔域における自然搅乱に依存した場所で多く採取されるもの(ゼンマイやクサソテツ)と、ワラビのように人為搅乱に依存した場所で多く採取されるものに分けられた。一方、キノコ採取の半は広葉樹林、全体の8割以上が老齢林で行われていた。これらは日帰り採取であり、林道沿いから徒步片道2時間以内で採取地に行き、対象種を徐々に変えつつ、多様な山菜・キノコを探取していた⁹。採取された山菜について使途ごとにみると、重量ベースで自家消費、個人売買、贈答の順に多かった。さらに、1日あたりの採取重量と年間採取日数から年間の採取頻度を推計すると、3ヶ月で1040人日の山菜採取が行われ、昭和50年代頃までと比べると相当に減少しているが、潜在的には大きな経済価値があると推定された。また、山林から採取された山菜・キノコが副食に使われる割合は民宿・旅館経営で5~7割と推定され、年間3万人以上が宿泊する檜枝岐村では地域経済に対して大きな貢献をもたらすこと、などを示していた⁹。渓流で釣りを行っている人の利用頻度は、南会津と阿武隈山系の天然林がほぼ同等、阿武隈山系では人工林よりも天然林の方が高かった。また、南会津では阿武隈山系に比べて遠方からの釣り人が多かったので、そこの天然林は生態系機能としての評価は低いが、阿武隈山系より大きなサービスを提供していることがわかった⁹。

茨城県北部における調査では、ソバの花粉を媒介する昆虫には、森林を主な生息地として利用している種が高い割合で含まれていた。また、日本土着の花粉媒介者であるニホンミツバチの個体数は、ソバ畠周囲3km圏内の森林面積の上昇とともに増加し、ミツバチ以外の訪花昆虫の個体数もソバ畠周囲100m圏内の森林を含む自

然植生面積の上昇とともに増加した¹¹。さらに、ソバの結実率は、ソバ畠周辺の森林面積と自然植生面積の増加とともに上昇した。ニホンミツバチについては、その個体数、広葉樹天然林と針葉樹人工林の面積などを用いて解析したところ、広葉樹天然林面積だけがニホンミツバチの個体数に強い正の効果を示したことから、針葉樹人工林よりも重要であることが分かった。

5. おわりに

生態系サービスは自然科学と社会科学のいずれかの立場から評価される場合がほとんどであるが、本稿で紹介した事例研究では山菜、キノコ、渓流魚を事例に、自然科学と社会科学の両面からアプローチしている。そして、どちらの側面から評価するかによって大きな差が生じうることを示すとともに、双方からのアプローチを有機的に組み合わせることによって、より実態に即した客観的な評価が可能であることを示している。また、農地の近くに良質な森林が存在することによって、土着昆虫による農作物に対する生態系調整サービスの向上や安定化が期待できることが明らかにされている。

環境省は里山イニシアティブを海外に発信しようと努めてきたが、日本における事例として、多様な森林利用が行われ、花粉媒介などの機能が高い二次林を持つ多雪域や里山地域などを挙げることができる。森林管理のための公的支援を、農地に隣接する里山林の管理(針葉樹から広葉樹への樹種転換、広葉樹林の輪伐利用など)に重点的に投入することによって、農業基盤を安定化させ、地域社会の持続的発展に対してより効果的に貢献することができると言える。

謝 辞

本研究の一部は、環境省地球環境研究総合推進費「里山イニシアティブに資する森林生態系サービスの総合評価手法に関する研究」の助成金として行われました。研究の遂行に努力された方々に深く感謝の意を表します。

References

1. A. Magurran: *Measuring Biological Diversity*. Blackwell (Boston) (2004)
2. D.L. Hawksworth: *Biodiversity Measurement and Estimation*. Chapman & Hall (London) (1995)
3. N. Myers: *The Sinking Ark*. Pergamon Press, (Oxford) (1979)
4. P. Ehrlich, A. Ehrlich: *Extinction: The Causes and Consequences of the Disappearance of Species*. Random House, New York (1981)
5. G. C. Daily, ed.: *Nature's Services*. Island Press (Washington D.C.) (1997)
6. R. M. Hassan, R. Scholes, N. Ash: *Ecosystems and Human Well-being*. Island Press (Washington D.C.) (2005)
7. 杉村乾: 環境情報科学論文集, 26, pp.313-318 (2013)
8. 河原崎里子・杉村乾: 日林誌, 94(2), 95-99.
9. 森林総合研究所・長崎大学・神戸大学ほか: 環境省環境研究総合推進費終了研究成果報告書(E-801) (2011)
10. 松浦俊也・林雅秀・杉村乾・田中伸彦・宮本麻子: 森林計画誌, 47(2), pp.55-81. (2013)
11. H. Taki, K. Okabe, Y. Yamaura, T. Matsuura, M. Sueyoshi, S. Makino, K. Maeto: Basic Appl. Ecol., 11, p.594-602 (2010)

溶融塩電解法を用いたレアメタルのリサイクル

市野 良一^{1*}, 神本 祐樹¹

Recycle of Rare Metals Using Electrolysis in molten Salts

Ryoichi ICHINO and Yuki KAMIMOTO

EcoTopia Science Institute, Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464-8603, Japan

Abstract

Rare earth elements are categorized as critical metals and essential sources for industries. The recycling of rare earth elements from wastes is required in terms of securing resources. As neodymium magnets have excellent magnetic property, those are used for motor magnets in vehicle. In this study, we focused on the electrochemical behavior of neodymium magnet in molten LiCl - KCl eutectic salts at 723 K for recycling technology development of the magnets. Resulting from analysis of the composition for neodymium magnets and molten salt after electrolysis, ratio of the rare earth elements was reduced significantly in a magnet. Rare earth composition except for the Li, K and Cl, as were derived from molten salts, showed 98.7 mass% or more. As for the recycling of W from the WC-Co cemented carbide, it was found that Co and W can be separated by the molten salt electrolysis at -0.7 V for WC-Co alloys. Taken with the exception of NaOH, W was 98.9 mass% in the molten salt. Co in the precipitate was a metal state and 96.8 mass%.

Key Words: Recycle, Electrolysis, Molten Salts, Rare Metal

1. 緒言

レアメタルの一種であるレアアース（希土類金属）は次世代自動車のモーター用磁石、蓄電池など素材に少量添加することにより、材料機能を飛躍的に向上させる目的で磁性材料や機能材料に使用されている。レアアースはその生産の90%以上を中国が占め、極めて偏在性の大きな資源であり、その国情勢に供給が左右されている。わが国のような金属資源の大部分を海外から輸入している先進工業国においては、産業の国際競争力の維持・発展のためには、レアメタルの安定した資源の確保、すなわち、新規産地の開拓、備蓄、省資源、さらには環境に配慮した資源の循環利用等の供給の多様化が求められる¹。

ネオジム磁石や超硬工具などは、レアアースを主に使用した代表製品であり、それらは産業・生活圏内で重要な役割を果たしている。ネオジム磁石はNd, DyなどのレアアースとFe, Bの合金を主相としており、耐熱性を上げるためジスプロシウムが添加されている。強磁力という特性から、近年のハイブリッド自動車や電気自動車のモーターにはネオジム磁石が用いられ、その需要の増加に伴いネオジム磁石の需要が増加している。一方、超硬工具は古くから機械加工に用いられ、CoをバインダーとしてWC粒子を結合させたWC-Co合金で構成されている。超硬工具の製造工程内のリサイクル粉等の再利用は、各個企業の努力によりかなり進んでいるが、市

中の超硬工具スクラップにおける我が国のリサイクル率は30%程度と低い水準である²。鋼やアルミニウム等は長い歴史の中でリサイクルシステムが構築されている。しかしながら、レアメタルのようにリサイクルの歴史が浅く、さらに、はなぐり的に使用される微量元素については、そのリサイクルは開発途中である。金属のリサイクルは、鉱石から金属を得る金属製錬³によくたとえられるが、製錬においては鉱石に当たる廃棄物の量、組成などが一定ではないためリサイクルを一層困難にしている。工程内廃棄物の場合は組成が一定であり排出量も工程により見込まれるが、市中からの廃棄物においては廃棄物の収集が一番初めに必要となる。次に、廃棄物の組成が一定ではないため、できる限り近しい組成のものを集める物理的な濃縮工程が必要となる。これは、その次に行われる分離工程をやりやすくするために必要なものである。物理的分離は大まかな分離に適しており、高純度化を進めるには化学的分離工程が行われる。何らかの物理的・化学的差を利用して分離が進められる中で、廃部品からすべての金属を高純度に回収・リサイクルするにはコストとの競合になる。廃金属を酸に全て溶解して、沈殿分離、溶媒抽出やイオン交換等を繰り返すことにより高純度な金属を得ることが可能であるが、最終目的の金属の純度を高くするとコストも高くなるため、金属によっては非鉄金属製錬などの製錬プロセスにうまく組み込んで行われている。

2. 溶融塩電解を用いたレアメタルのリサイクル例

溶融塩電解法は電気化学プロセスの一種であり、高温で溶融した塩を溶媒として電気分解する方法である。水

1 名古屋大学 エコトピア科学研究所

* r-ichino@esi.nagoya-u.ac.jp

平成26年5月2日受理

中におけるレアアースの還元電位は水素発生電位よりも著しく卑なため、水溶液からのレアアースの還元は困難である。しかしながら、溶融塩电解法では広い電気化学窓や高いイオン導電性、化学的安定性などの特徴があるため、これらによりレアアース元素の回収が可能となる。レアアースの製錬では様々なプロセスで高純度なレアアースの酸化物を回収し、それをもとに溶融塩电解法で還元することにより金属としている。

Alは溶融塩电解により製造されており、 Na_3AlF_6 に Al_2O_3 を添加して約1000°Cで溶融塩を作製し、グラファイト電極を用いて电解すると得られる。MgやCaなどは MgCl_2 や CaCl_2 の溶融塩を直接电解することにより得ることができる。筆者らは、水素吸蔵合金の $\text{LaNi}_5^{4,5}$ や Mg_2Ni^6 なども溶融塩电解によって作製してきた。これらは、 $\text{NaCl}\text{-KCl}$, $\text{LiCl}\text{-KCl}$ などの共晶溶融塩中に LaCl_3 を添加し、Niを電極としてカソード电解すると、Ni上にLaが析出し、1023Kと温度が高いゆえにNiとLaが相互拡散し、条件によって LaNi_5 や LaNi_3 などが電極上に生成するのである。また、 MgCl_2 溶融塩中でNi電極を电解すると条件によっては Mg_2Ni が生成する。このように、溶融塩中では純金属の析出のみならず、条件によっては合金の生成も起こり得るため応用分野は広いといえる。 LaNi_5 の場合⁵、この溶融塩中ではLaはNiよりも卑な金属である。溶融塩中で LaNi_5 をNi電極上に作製した後、 LaNi_5 をその溶融塩中で微少アノード電流により定電流电解したところ、电解の進行とともに電位が変化し、最終的にはNi金属単体の電位となった。皮膜の成分分析を行ったところ皮膜中のLa濃度が減少しており、 LaNi_5 からLaの選択的溶解が進行したことを見ている。さらに、温度が高いため LaNi_5 皮膜内部のLaが時間と共に電極表面に拡散し、溶出していくため、最終的にNiのみの電位となったのである。このことを応用したのが次節のネオジム磁石からの希土類の回収である。銅の电解精製では、アノードからは相対的に卑な金属が溶媒中に溶出し、相対的に貴な金属は固体として残る(陽極泥として沈殿)。その一方で、カソード上では溶媒中のイオンの中で相対的貴な金属が析出し、卑な金属は析出しない。すなわち、电解析出させたい目的金属よりも貴な金属イオンは溶媒中に存在しないことが重要となる。

2.1 ネオジム磁石(Nd-Fe-B)の場合^{7,8}

ネオジム磁石の構成成分から考えると、Nd, Dyが卑な金属となるため、アノードにネオジム磁石を用いることによりレアアースを選択的に溶出させ、Fe, Bは固体

Table 1 Content of metal elements in magnets and molten salts before and after electrolysis (mass%)

	Nd	Dy	Pr	Fe	B	Al
Before electrolysis						
Magnet M1	18.8	1.5	3.0	75.7	1.0	N.D.
Magnet M2	18.0	9.7	3.9	67.0	0.8	0.5
After electrolysis						
Magnet M1	7.2	0.8	3.0	84.8	4.1	N.D.
Magnet M2	1.0	0.7	0.2	96.3	1.3	0.5
Molten Salts M1	97.0	1.2	0.5	N.D.	1.3	N.D.
Molten Salts M2	51.1	35.2	10.8	2.1	N.D.	0.8

として残存する。一方、カソードではレアアースイオンが還元されて金属として回収するプロセスが可能となる。この場合、溶融塩中で磁石の構成元素の電気化学的挙動の把握が重要となる。

2.1.1 実験方法

磁石に由来する金属の溶出電位および析出電位はリニアスイープボルタムメトリーによるアノード及びカソード分極測定から評価した。得られた結果より、レアアースが選択的に塩中に溶出する電位および析出する電位で定電位电解を行い、その有効性について評価した。溶媒には $\text{LiCl}\text{-KCl}$ の共晶組成(59.2-40.8mol%)の溶融塩を用いた。これを24時間200°Cで乾燥したもの用いた。使用した磁石の組成をTable 1に示す。浴温を450°Cとし、作用極にはニッケルめっきを剥離した組成の異なるネオジム磁石、Nd, Dy, Fe, Ni, Ta, Al板を使用した。対極に高純度グラファイト電極を使用し、参照電極は Ag/Ag^+ (0.1N) in $\text{LiCl}\text{-KCl}$ 電極を用いた。反応槽はガラス製容器用い、アルゴン雰囲気下で実験を行った。ポテンショスタットには北斗電工製HZ-5000を用いた。作用極を电解による磁石粉の塩中への落下を防止するために定電位电解ではタンタルで作製した箱電極とし、タンタル箱電極にネオジム磁石を入れ、定電位电解を行った。溶出試験後、溶融塩を分取し120°Cで乾燥した。定電位电解後、塩ならびにアノード、カソードを回収し、純水あるいは酸に溶解して希釈したのち、それぞれICP-AESにより元素の組成を測定した。

2.1.2 実験結果

(1) アノード分極測定

ネオジム磁石と各金属(Nd, Dy, Fe, Al, Ni, Ta)の浸出電位をFig.1に示す。-2.0Vより卑な電位でレアアースであるNdとDyの酸化電流が現れた。また、-0.8Vよりも貴な電位ではFe, Niの酸化電流が見られた。この結果より、およそ-0.8~-1.4Vの領域で定電位电解を行うことにより磁石中のレアアースが選択的に塩中に溶出するものと考えられる。TaやNiは酸化電流の立ち上がりが電位が高かった。このことから定電位电解において、タンタル箱電極の使用が电解に影響を及ぼさないこと、磁石表面のニッケルめっきの除去が必要であることが分かる。

2種類の組成の違う磁石においてその分極曲線に違いが見られた。Magnet①は焼結法、Magnet②はHDDR法により製造されたネオジム磁石である。Magnet②のように、Dyをおよそ10mass%添加し磁石の耐熱性を高めたものは、後工程として表面からDyを粒界に拡散す

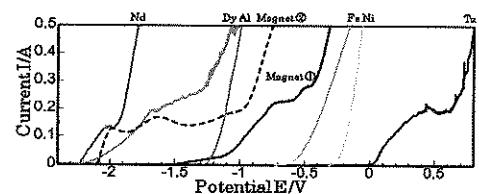


Fig.1 Anode polarization curves on magnet and metals in molten salts

る粒界拡散法を施して製造される⁹。アノード分極測定の結果より、溶出における定電位電解電位を-1.0Vとした。同様にして、溶融塩中に希土類塩化物を添加してカソード分極曲線測定を行ったところ、およそ-1.5~-1.8Vの領域で溶融塩中の希土類元素が析出することが分かり、-1.8Vで希土類の電解析出を行った。

(2) 定電位電解

電位-1.0Vでネオジム磁石中のレアアースの定電位電解を行った。この時の電流と時間の関係をFig.2に示す。電流値はまず急激に減少し、電流の振動を示した後に徐々に増加し、再び減少し最終的に流れなくなる。磁石表面近傍のレアアースの溶出、磁石内部から表面への拡散、磁石表面の剥離などによる電流の変化と考えられる。電解後の溶融塩は2種の磁石のものどちらにおいてもNd³⁺の存在を示す薄青色を呈していた。この電解後の溶融塩とネオジム磁石をICP-AESによって組成分析した。この結果をTable 1に示す。本研究ではNd、Dy、Prの3種をネオジム磁石中のレアアース元素として考

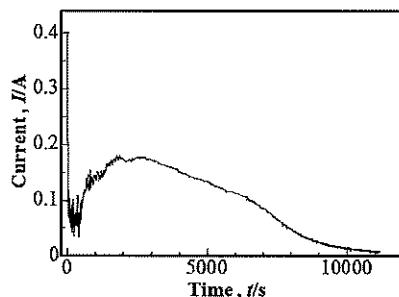


Fig.2 Chronoamperometry on magnet 2 at -1.0 V

えている。電解後の磁石ではそれぞれ、レアアース元素の割合が大きく減少していた。溶融塩に関しては、溶融塩成分のK、Liを除外して考えると、Magnet①とMagnet②のそれぞれにおいてレアアース組成が98.7mass%、97.1mass%を示した。以上の結果より、2種の組成の違う磁石においてレアアースの選択的浸出を確認した。

一方、レアアースを溶出させた溶融塩中で-1.8Vで電解析出を行ったところ、作用極上の析出物は95mass%以上がレアアース成分であった。

2.1.3 結言

磁石成分によって溶融塩電解による溶出挙動は異なったが、-1.0Vの定電位電解によりレアアースが選択的に溶出することが確認され、溶融塩成分(K、Li)を除くと溶融塩中にレアアースが97.0mass%以上の組成となった。また、溶融塩中で-1.8Vで電解析出を行ったところ、作用極上の析出物は95mass%以上がレアアース成分であった。

2.2 超硬合金(WC-Co)の場合¹⁰

超硬合金の主成分はWC-Coであることから、W成分を溶出させて最終的にパラタンクスチタン酸アンモニウム(APT)あるいはタンクスチタン酸(WO₃)として回収するか、あるいはバインダー成分を溶出させてWCと

して回収する方法が考えられる。ここでは、溶融塩に水酸化ナトリウムを使用して§2.1と同様に溶出試験を行い、W成分の溶出について検討した。

2.2.1 実験方法

リニアスイープボルタメトリーによるアノード分極測定と定電位電解によるレアメタル溶出実験及び、カソード分極測定による析出電位の確認を行った。アノード分極測定は超硬合金由来金属の溶出電位を測定した。得られた結果より、レアメタルが選択的に溶融塩中に溶出する電位で定電位電解を行った。カソード分極測定では、WO₄²⁻及びNaOH溶媒の還元挙動について検討した。

溶媒としてNaOHを用い、450°Cで溶融させた。前処理として24時間200°Cで乾燥させた。電極として用いたWC-Co合金の組成をTable 2に示す。参照電極にはAg/Ag⁺(0.1N)in NaOH電極を用いた。反応槽はアルミニナ製容器(SSA-H)を用い、Ar雰囲気下で実験を行った。分極測定の掃引速度は5mV/sとした。カソード分極測定では、作用極にW板、対極にW板を使用した。また、Wの析出測定では、NaOH溶媒にNa₂WO₄を0.35mol%となるように添加した溶融塩を用いた。

Table 2 Content of elements in WC-Co alloy, and molten salts and precipitates after electrolysis (mass%)

	W	Co	Ta	Cr	Ni	O
WC-Co Alloy	82.3	10.7	0.9	0.6	0.1	5.4
Molten Salts	98.9	0.1	0.3	0.1	0.6	N.D.
Precipitates	16.2	79.4	2.1	1.5	0.3	0.4

定電位電解後、溶融塩ならびに溶融塩中の沈殿物を回収した。溶融塩は純水に、沈殿物は11.7mol%フッ化水素酸と3.5mol%硝酸の混合溶液に溶解させ、ICP-AESで組成を分析した。また沈殿物、対極をXRD測定により、同定した。

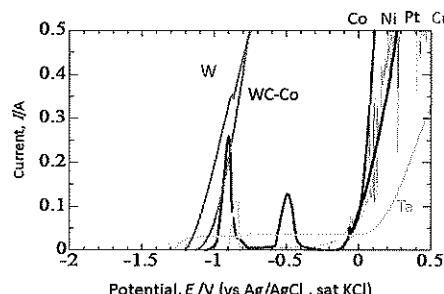


Fig.3 Anode polarization curves on WC-Co alloy and metals in molten salts

2.2.2 実験結果

(1) アノード分極測定、カソード分極測定

WC-Co合金と合金成分の各金属(W、Co、Ta、Ni、Cr)のアノード分極曲線をFig.3に示す。Wの溶出電位は-1.2V付近であった。Taは、NaOH溶融塩中に浸漬させるだけで溶解した。そのためタンクスチタンよりも卑な電位での立ち上がりを示した。Ni、Coは不働態現象を示した。また、-0.2Vよりも貴な電位ではCo、Ni、

Cr 金属では溶融塩の酸化あるいは金属電極の酸化による電流の増加が見られた。これらの結果より、およそ -1.2V ~ -0.2V の領域で定電位电解すると WC-Co 合金中のレアメタルが選択的に溶融塩中に溶出するものと考えられる。アノード分極測定の結果より、定電位电解における电解電位を -0.7V とした。

一方、カソード分極測定において、溶融塩中の Na_2WO_4 の有無に依らず同様の挙動を示しており、分極測定後の W 電極上には何も付着していないかったことから、W の析出は起こらないものと考えられる。

(2) 定電位电解

-0.7V の電位で WC-Co 合金中レアメタルの定電位电解を行った。电解後の溶融塩は黒色を示していた。これは、WC の W と C が分離し、W は溶融塩中に WO_4^{2-} として溶出し、C が溶融塩中に残存したか、あるいは微粉末になった WC が剥離浮遊したものと考えられる。电解後の溶融塩と沈殿物を ICP-AES によって組成分析した。この結果を Table 2 に示す。溶融塩に浸出された成分は Na を除くと 98.9mass% が W であった。W の分解反応を、溶融塩中では、 Na_2WO_4 となると考え、6 電子反応と仮定して計算した電流効率は、57.5% であった。C が炭酸イオンとして溶出すると考えると全体には 10 電子反応となり¹¹、電流効率は 95.8% であった。また沈殿物を回収し、XRD 分析を行った結果を Fig.4 に示す。沈殿物からは、79.4mass% の Co と 16.2mass% の WC で構成されていた。沈殿物中のコバルトは金属コバルトであることを確認した。WC のバインダーとして使用される Co は、WC の溶出によって、溶融塩中に沈殿物として存在することが確認された。

2.2.3 結言

アノード分極測定によって WC-Co 合金中の各金属の溶出電位を測定した結果、W の浸出電位は -1.2V 付近であった。一方、Co, Cr, Ni は -0.2V よりも貴な溶出電位を示した。これらのことから WC-Co 合金を -0.7V で定電位电解することにより、W と Co が分離できることがわかった。W は、溶媒成分の NaOH を除くと、溶融塩中に 98.9mass% あった。また、沈殿物中の Co は、金属状態であり、沈殿物中に 79.4mass% 存在した。今回用いた电解条件では、 WO_4^{2-} から金属 W への還元は起こらず、溶媒の分解反応が起こると考えられる。このことから WO_3 , ATP などの W 化合物として回収することが、必要であるといえる。

3. 終わりに

溶融塩电解を利用したネオジム磁石のリサイクルの方法には、金属を隔膜として利用する方法や Ca 還元を併用した方法、Fe との合金化して得る方法などもある。また、廃磁石を酸化した後、酸に溶解させ、溶媒抽出を行うことによって分離し、希土類酸化物を得る方法があ

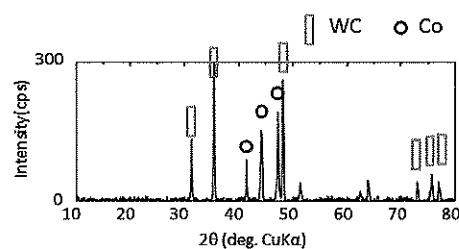


Fig.4 XRD pattern of precipitate after electrolysis

り、実用化されている。ほかにも、 FeCl_2 を利用した希土類の塩化法やショウ酸を用いた水熱法などが研究されている。一方、超硬合金のリサイクル法に Zn 法があり、これはバインダーである Co を Zn と合金化することにより WC から引離し WC として回収する方法である。ここでは、溶融塩电解を利用した方法を主に説明したが、固相、液相、気相の違いはもちろんのこと、物理的・化学的差を利用して高効率に分離する技術の開発が望まれている。

References

1. *Kikinzoku · Reametaru no risaikurugijutsu shuusei*, NTS (Tokyo), § 1, (2007)
2. H. Itoh: J. MMIJ, 129, 4, pp.97-106 (2013)
3. Ed. Nihon Kinzoku gakkai: *Kinzokukagaku nyuumon siri-zu 3, Kinzokuseiren kougaku*, Maruzen (Tokyo) (1999)
4. H. Yamamoto, K. Kuroda, R. Ichino and M. Okido : Denki Kagaku, 66, 5, pp.549-555 (1998)
5. H. Yamamoto, K. Kuroda, R. Ichino and M. Okido : Denki Kagaku, 68, 7, pp.591-595 (2000)
6. H. Yamamoto, Kawakami, K. Kuroda, R. Ichino and M. Okido: Electrochemistry, 67, 6, pp. 655-660 (1999)
7. Y. Kamimoto, G. Yoshimura, R. Endo and R. Ichino: Proc. the 22th MRS-J Sympo. (IUMRS-ICE2012), B-23-G, p.48, Pacifico Yokohama, Sep.23-28 (2012)
8. G. Yoshimura, Y. Kamimoto and R. Ichino: Proc. MMIJ annual meeting (2013 Sapporo), pp. 491-492, Sep. 3-5 (2013)
9. M. Sagawa: *Neojimu Jishaku no Subete, Agune Gijutsu senta* (Tokyo) p. 52 (2011)
10. M. Kamiya, Y. Kamimoto and R. Ichino: Proc. MMIJ annual meeting (2013 Sapporo), pp. 489-490, Sep. 3-5 (2013)
11. T. Ohishi, M. Yaguchi and M. Tanaka: J. MMIJ, 129, 12, pp.707-712 (2013)

レアメタル（レアアース）リサイクルの技術的・経済的課題¹

河邊 憲次^{2*}

Technical and economical issues on rare metal (rare earth element) recycling

Kenji Kawabe

President, CMC Technology Development Co. Ltd.,

Abstract

尖閣問題に端を発した中国のレアアース禁輸措置及びその後のレアメタル（レアアース）の価格高騰は、我が国の先端技術産業と資源政策に大きな衝撃をもたらした。その後の我が国、産業界のレアアース使用量削減努力及びレアアースの価格低下により、レアメタル（レアアース）問題は沈静化したかに見える。しかし、その問題の本質は変わっていない。ここでは、今回のレアメタル（レアアース）問題を資源問題としてとらえ、その解決手段の一つとしてのレアメタル（レアアース）リサイクルの現状とその必要性及び新しいリサイクルコンセプトについて考察する。

Key words : レアメタル、レアアース、リサイクル、資源戦略、モバイルプラント

1. はじめに

レアメタル（レアアース）問題に関わることになったのは、2010年12月に設立したレアメタル資源再生技術研究会 (<http://www.raremetal-forum.jp/>) の設立に携わり、また当社（シーエムシー技術開発株式会社）が同研究会の運営事務局を引受けことになったのがきっかけである。その直前の2010年9月の尖閣問題に端を発した中国のレアアースの禁輸措置とその後のレアメタル（レアアース）の価格高騰は、特に我が国の先端技術産業と資源政策に大きな衝撃をもたらした。連日のような新聞、テレビの報道により、レアメタル（レアアース）が自動車、IT製品等の製造に不可欠な素材であり、我が国の産業競争力の要であることが、国民に衆知されることとなつた。

1. 平成26年6月5日本会132会例会において発表

2. シーエムシー技術開発（株）

* 平成26年4月16日受理

国の緊急的な政策、①リサイクルを含む代替材料・使用量低減技術開発、②海外の鉱山開発・権益確保、③レアアース等使用量削減のための設備等補助、が平成22年度（2010年度）補正予算、総額1,000億円で実施された。

また、欧米諸国との連携により、2011年10月～2013年5月に亘り「日米欧クリティカルマテリアル・ワークショップ」が開催された。またそれらが、2012年3月の日米欧による中国のWTO提訴へと繋がった。

我が国、産業界のレアアース使用量削減の努力が功を奏し、現在（2014年）では、レアアース価格は高騰時の1/5～1/7に低下している。レアメタル（レアアース）問題は、“喉もと過ぎれば熱さを忘れる…”の状況に陥っているかのようである。

しかし、レアアース資源大国の国家戦略が要因であるレアメタル（レアアース）問題の本質は、まだ変わっていないと考える。

筆者は、1972年～1988年の16年間に亘り、東海再処理施設（現：（独）日本原子力開発機構）、六ヶ所再処理工場（現：日本原燃（株））の使用済核燃料の再処理（希

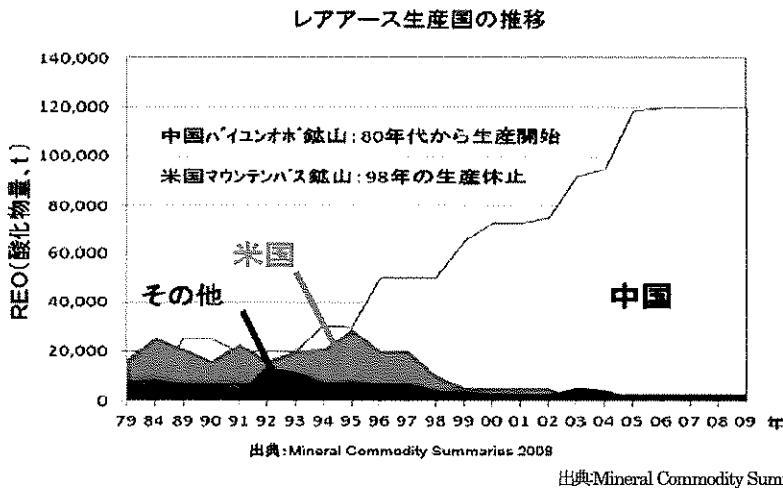


図1 レアアース生産国の推移

土類のアクチノイド系であるウラン、プルトニウム等の湿式法によるリサイクル）プロジェクトに従事した。

その経験も踏まえ、希土類のラントノイド系であるネオジム、ジスプロシウム等を含むレアメタル（レアアース）のリサイクルについて、その必要性と新しいリサイクルコンセプトについて考察する。

2. レアメタル（レアアース）問題

(1) 不安定なレアメタル（レアアース）の供給

レアメタル（レアアース）は、一般的に、生産性という面から希少性や偏在性が高く、生産国の輸出政策や政情、生産施設の状況等の他、今後は投資家の思惑などにも大きな影響を受ける対象となることが予測される。

特にレアアースについては、中国が低コスト生産により生産規模を拡大した結果、レアアースの世界供給の約97%を中国が占める構図が出来上がった。我が国は、レアアースの供給の90%強（2009年）を中国に依存している。2012年には、中国依存度が60%程度に低下したとされているが、低下分は中国産のレアアースが、フランス、ベトナム経由等で輸入されているものであり、実態は変わっていない。

(2) レアアース資源問題に関する日米欧・識者の見解

レアメタル資源再生技術研究会の運営事務局がシンポジウム事務局を務め、2012年10月1日～2日に

京都で開催した“レアメタルリサイクル国際協力シンポジウム「眠る都市鉱山」”で講演・発表した日米欧3人の識者のレアアース資源問題に対する見解を紹介する。以下の3氏は、いずれも先に述べた日米欧クリティカルマテリアル・ワークショップの関係者である。
①オランダ TNO 応用科学研究所 TNO Dr. Arnold TUKKER)

「資源危機の教訓と科学技術・政策」と題して講演し、次のような見解を述べた。

我々は、国連の二国間協力と貿易に関するデータベース（COMTRADE）を用いて、REE（レアアース）資源に係る経済的インパクトを見積もった。その結果、レアアースを含有する製品の世界貿易額は約1.5兆米ドル（150兆円）に昇り、これは世界貿易額の13%すなわち世界GDPの4%にも達する。注目すべきは、日本の輸出額の20%以上がレアアースを含有する製品であり、その利益は莫大なものである。

また、これらの背景を分析してみると驚くべきことが分かってくる。

第1に、レアアースは決して枯渇しない。その埋蔵量は最近の年間生産量の800倍以上である。

第2に、1985年までは、米国がレアアースの最大供給国であり、マウンテンパス鉱山閉山が中国一国集中の最大原因となった。

第3に、中国はたった一つの理由で輸出を制限した。その理由は、レアアースを必要とする自国のハイテク産業を育て上げるためである。

最後に、レアアースの製錬コストは、2007年までに年間10億米ドル（1,000億円）以下であったのに対し、1.5兆米ドル（150兆円）の価値の最終製品を製造できる。即ち、レアアースを使用した最終製品は、レアアース単価の1,500倍の付加価値を有している。つまり、「レアアースで中国は1円しか得られないのに、日本は1,500円も儲けている。」ということである。

次に、トゥッカーハー氏の予測と提案として、我々は、これから何年かレアアース価格の不安定市場に直面する。

今回のレアアース供給危機から学ぶべきことは、

- 1) 最終製品を生み出す製造業は、サプライチェーンの脆弱性にもっと注意を払うべきである。
- 2) 政府は、供給マーケットの失敗を克服するために経済援助をすべきであり、使用量削減やリサイクルを支援すべきである。（リサイクル促進のため実行可能なインセンティブを与える必要がある。）
- 3) 最近のレアアース問題で経験した不必要的危機を防ぐため、次の将来予測やシナリオ解析を確実に実施する。それは、
 - a. 希少物質に対する分析とモニタリング
 - b. 需要性の高い物質に対するシナリオ開発（ハイブリッド車や電気自動車への移行等）
 - c. 時間を関数とする世界のマテリアルフロー解析（グローバルな“都市鉱山マップ”的作成）である。

トゥッカーハー氏は5. レアメタル（レアアース）の新しいリサイクルコンセプトで述べるNEDO支援事業のレアアース回収装置（モバイルプラント）を見学し、「EUが“グローバル都市鉱山マップ”を作り、日本の“モバイルレアアース回収装置”で、世界の“都市鉱山”開発をしてはどうか……」と提案して、帰国した。

②米国エレクトロン・エナジー・コーポレーション(EEC社)²⁶チンス・チナサミー氏の見解 (Electron Energy Corporation Dr.Chins CHINNASAMY)

「希土類磁石のリサイクル技術の現状と先端技術開発」と題して講演し、

- ・産業界はレアアース材料をリサイクルする新しい道を開拓はじめている。
 - ・有力な候補として、使用済み磁石及び他の磁石回収資源からの磁性材料のリサイクルが考えられる。
 - ・今後10年間、ジスプロシウム(Dy)とテルビウム(Tb)が不足し、需給バランスが取れないことが予測される。重希土類については、その資源回収の必要性を十分考慮しなければならない。
 - ・レアアース及びその合金の信頼性あるサプライチェーンの構築は、レアアースの使用者にとって大きな関心事である。
 - ・希土類磁石のリサイクル技術・新技術開発及びその経済合理性が重要である。
- との見解を述べている。

注) EEC社は、米国で唯一のネオジム磁石製造メーカーである。

- ③独立行政法人物資・材料研究機構 原田幸明氏の見解
「資源問題の新段階に対応する都市鉱山開発の新たな方向」と題して講演し、
 - ・資源問題は新たな段階に入った。それは不安定の領域である。
 - ・二つの異なるタイプの危機を生起させる。
 - 1) 確実に迫る、現有埋蔵量に対する過剰な資源消費（発展途上国の経済発展）
 - 2) 突然襲ってくる、レアメタル（レアアース）の急速な需要の増加と供給のアンバランス（先進国技術イノベーションによる新たな需要と急速な市場化）
 - ・都市鉱山開発の役割もこのような資源問題の変化の中で変わってくる。（これまでには、廃棄物・不要物からの有価物の取り出しであった。これからは……）
 - ・都市鉱山の活用は資源のサプライチェーンを身近な中で回し、突然の供給危機に備えること。
 - ・都市鉱山開発は、換金型リサイクルではなく、高付加価値製造型リサイクルに変わらねばならない。

上記日米欧の3氏ともに共通している見解は、

- 1) レアアース資源の供給は、今後も不安定な状況が続く

- 2) レアアース資源の供給では、身近で信頼性あるサプライチェーンの構築が重要
- 3) 経済合理性のあるレアアースリサイクルが必要である。

3. レアアース資源戦略

レアメタル（レアアース）の資源問題は、2010年9月の尖閣問題に端を発したものではない。その背景には、1980年代から始まったレアアース資源国（中国）の資源戦略があると見るのが常識的である。

（1）中国のレアアース資源戦略

中国では、1980年代から外貨獲得源としてレアアース鉱山の開発に力を注いきたが、低コストでの生産拡大によりレアアース市場が供給過剰となり価格が急落した。価格下落により採算が合わなくなった中国以外のレアアース鉱山（米国マウンテンバース鉱山等）は次々と閉山し、中国がレアアース生産国として独占的な地位を手に入れることとなった。1992年、当時の鄧小平副主席（後の国家主席）が、「中東に石油があるように、中国に希土類資源（レアアース）がある」と語り、中国のレアアース資源を国家戦略物資として位置付けた。

「中東に石油があるように、中国にはレアアースがある」から本格的に始まった中国のレアアース資源戦略は、その後、

- ①独占的なレアアース生産と資源保護政策
- ②輸出規制（輸出枠削減、輸出関税、対日禁輸措置）
- ③レアアース価格高騰（中国国内の投機も？）
- ④レアアース資源の国家管理（採鉱権管理、環境規制強化、産業再編）

へと進んだ。

日本国内は、1.はじめに述べたように「喉元過ぎれば…」の状況に陥っているかに見えるが、先の日米欧3氏の見解からも筆者は、中国のレアアース資源戦略は、次の段階へ着々と進んでいるとと考えている。それは、日米欧のWTO提訴の行方も見越し、

- ⑤中国国内にレアアース取引市場の創設
- ⑥日本のレアアース部材製品製造技術の取込み
- ⑦中国国内でのレアアース部材を使用したハイテク製品の生産

その上で、

- ⑧リサイクル技術の開発強化（中国はいずれ世界最大の都市鉱山保有国家）

そして、最終的に目指すのは、

- ⑨レアアース価格をコントロールする資源メジャー大国

と予測する。

（2）日本のレアアース資源戦略

日本のレアアースを含むレアメタル資源戦略は、

- ①代替材料・使用量低減技術開発
- ②リサイクル推進
- ③鉱山開発・権益確保
- ④備蓄

である。

日本は、中国の一時的「禁輸措置」以降、官民挙げての代替・使用量低減の技術開発及び海外の鉱山権益確保の努力が奏功し、レアアース使用量の抑制及び中国のレアアース資源への依存度の低減にとりあえず成功したかに見られている。

しかし、発展途上国の工業化に伴い、レアメタル（レアアース）の需要は確実に増大し、長期的には、貴重なレアアース資源を含む都市鉱山は世界各地に着実に拡大する。一方、ウラン、トリウム等放射性廃棄物の処理問題を内在するレアアース鉱山開発は、環境問題（即ち、高コスト化）が避けて通れない現実を抱えている。

日本のレアアース資源戦略は、日本オリジナルのコンセプトである“都市鉱山（Urbanmine）”を日本の新しいリサイクルコンセプトで開発し、グローバルに展開することも一案ではないだろうか。

4. レアメタル（レアアース）リサイクルの現状

我が国では、従来から表1に示すレアメタル含有廃製品からのレアメタル（レアアース）のリサイクルが行われている。これらは、既に廃製品の集・回収システムが整備されているか、製造工程内スクラップとして安定した量のレアメタル（レアアース）廃材の供給体制が整っているものが、主にリサイクルの対象となっている。また、これらレアメタル（レアアース）のリサイクルに関わっている企業を表2に示す。

表1 レアメタル含有廃製品のリサイクルの現状

レアメタル含有 廃製品	金属種	リサイクル率
触媒	白金、パラジウム、ニッケル、モリブデン、バ ナジウム	廃製品 70%
超硬工具	タングステン、コバルト	廃製品 10%
二次電池	ニッケル、コバルト、カドミウム、リチウム	廃製品 60%
特殊鋼	ニッケル、クロム、モリブデン、タングステン、コ バルト	工程スクラップ ^a 100%
ネオジム磁石	レアアース	工程スクラップ ^a 35%
ITOターゲット材	インジウム	工程スクラップ ^a 53%
蛍光管	イットリウム	工程？、廃製品？
半導体ウエハ	ガリウム	工程スクラップ ^a 43%

表2 国内の主要なレアメタルリサイクル企業

リサイクル対象	主要なリサイクル企業
触媒	日本PGM、田中貴金属、ジョンソンマッセイ、アサヒプリテック、太陽鉱工、メタル テクノロジー、日本キャタリストサイクル
超硬工具	アライドマテリアル、日本新金属、大阪鉛錫精錬所、光生、矢野金属、サンアロ イ工業
二次電池	TMC、日本リサイクルセンター、三井金属鉱業
特殊鋼	大同特殊鋼、日立金属、愛知製鋼、三菱製鋼、山陽特殊製鋼
ネオジム磁石	三徳、信越化学工業、昭和電工、中電レアアース
タンタル、ニオブ	三井金属鉱業、中部貴金属精錬
チタン	東邦チタニウム、大阪チタニウムテクノロジー、神戸製鋼、大同特殊鋼、昭和メタ ル、大阪特殊合金
ペリリウム	日本ガイシ
ガリウム	DOWA エレクトロニクス、ラサ工業、住友化学工業、日亜化学工業
インジウム	住友金属鉱山、DOWA メタルマイン、三井金属鉱業、JX日鉱日石金属、アサヒ プリテック、アジア物性材料研究所
イットリウム	日本イットリウム
めつき廃液、 スラッジ	ミヤマ、みすず工業、鶴見曹達、三進製作所、日本カニゼン
電子基板	DOWA、三井金属鉱業、JX 日鉱日石金属、三菱マテリアル

これら既存のレアメタル（レアアース）リサイクル企業は、既にある自社のレアメタル（レアアース）関

連製品の製造工程設備を活用し、その中にレアメタル（レアアース）のリサイクル原料を一部取り込むこと

表3 非鉄製錬所で回収されているレアメタル

パラジウム(Pd)、白金(Pt)、ニッケル(Ni)、インジウム(In)、アンチモン(Sb)、ビスマス(Bi)、セレン(Se)、テルル(Te)、ガリウム(Ga)、ゲルマニウム(Ge)
--

でリサイクルしているのが大多数である。また、電子基板や自動車解体時のシュレッダーダストなどがリサイクル原料として非鉄製錬所などで大量に処理されている。しかし、非鉄製錬所では、回収金属の主体はあくまで銅、亜鉛、鉛などのベースメタルであり、経済合理性に合う金、銀など貴金属、そしてパラジウム、白金等の8~10種類のレアメタルである。非鉄製錬所で現在リサイクルされているレアメタルを表3に示す。非鉄製錬所では、ネオジム(Nd)、ジスプロシウム(Dy)等レアアースは、溶融スラグに移行し、回収はできていない。

いずれにしろ、既存のリサイクル処理設備は大規模な工場形式が大多数である。また、リサイクル原料が一定量以上安定して供給されることが採算性の面から前提となる。従って、工業製品として市場に出て不特定、多品種の廃製品となつたいわゆる“都市鉱山”からのレアメタル（レアアース）のリサイクルは既存の社会・産業システムではその対応に限界があり、リサイクルが極めて困難な場合が多い。

5. レアメタル（レアアース）の新しいリサイクルコンセプト

(1) 新しいリサイクル技術によるレアメタル（レアアース）回収装置の開発

レアメタル資源再生技術研究会では、ネオジム磁石分科会、超硬工具分科会等を設け、ネオジム磁石からのレアアース（ネオジム、ジスプロシウム）及び超硬工具からのレアメタル（タングステン、コバルト）のリサイクル技術の研究開発を会員有志を中心に行っている。

これまでに、経済産業省、(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の公的支援を受け、

- 1) 廃ネオジム磁石からのレアアース回収装置
- 2) 回収レアアースからのNd、Dy分離精製装置
- 3) 廃超硬工具からのW、Co分離回収装置

を開発、実証、実用化した。

これらの装置は、廃ネオジム磁石、廃超硬工具を1日当たり50~100kgの処理が可能である。いずれの装置もコンパクト、低コスト、高効率、低環境負荷として可搬式（モバイル）を設計コンセプトとして開発し、小規模処理装置で経済合理性に合うレアメタル（レアアース）のリサイクルが可能なものである。これら装置は、いずれも、国際標準の20フィートコンテナに収まる寸法・形状で設計されている。（図2）

(2) モバイルプラントによる新しいリサイクルコンセプト

レアメタル（レアアース）のリサイクルは地産地消がベストであるといわれている。

“レアメタル（レアアース）の都市鉱山”は全国各消費地、工業地域に点在し、また、全世界に大小さまざまに分散している。経済大国は勿論のこと、今後、工業製品の大量消費が見込まれる発展途上国においても廃製品の都市鉱山化が進むと予測する。また、日本を含む海外から発展途上国へのIT、自動車産業の進出による工業化とそれに伴う製造工場からのレアメタル（レアアース）を含む廃材も加わり、都市鉱山は今後、益々グローバルに拡大するものと思われる。

このような我が国及び海外の都市鉱山の廃製品、廃材からレアメタル（レアアース）をリサイクルするには、その膨大な物流量から考えて、特定のリサイクル施設へ収集するのは経済合理性のみでなく環境負荷の点から極めて困難が予想される。

レアメタル資源再生技術研究会の有志企業では、「点在する都市鉱山から集めてくるリサイクル」ではなく、「都市鉱山（集まつた所）に出向いてリサイクル」するモバイルプラントによる新しいレアメタル（レアアース）のリサイクルコンセプトを検討している。

鉱工業生産統計、世界貿易データベース（COMTRADE）及びリサイクル現場の最新情報等の

いわゆるビッグデータを活用した、地域のマテリアルフローナリシス(MFA)を行い、経時的都市鉱山マップを作成して、それら情報を有効活用した、ネットワー

ク型、業際型のリサイクルシステムの構築を目指したいと考えている。

モバイルプラントによる新しいリサイクルコンセプトを図3に示す。

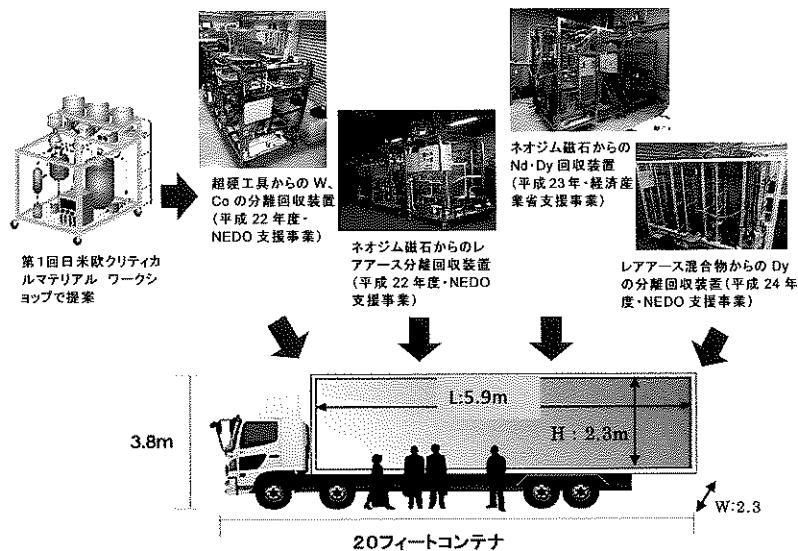


図2 レアメタル（ニアース）モバイルプラント

【現状】

【新しいコンセプト】

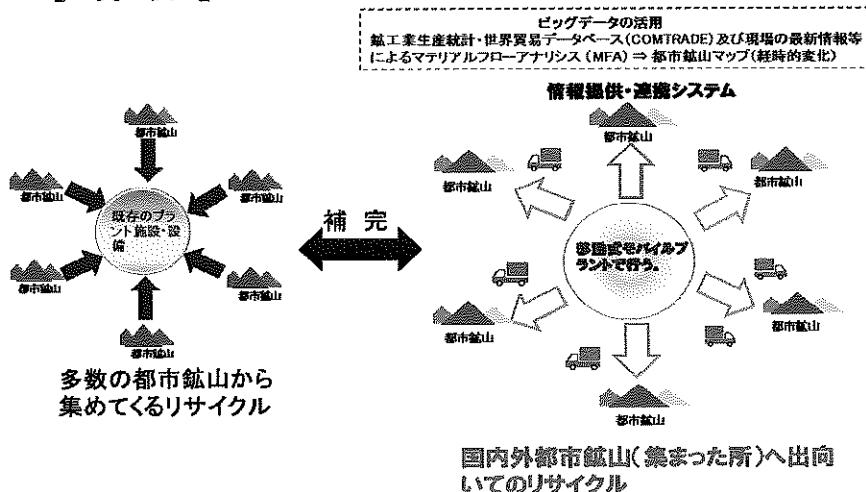


図3 レアメタル（ニアース）の新しいリサイクルコンセプト

6. おわりに

レアメタル（レアアース）の新しいリサイクルコンセプトによるレアアース回収事業は、国の支援事業も受け既に、レアメタル資源再生技術研究会の会員企業有志で始まっている。処理規模 1 日当たり 50～100 kg（ネオジム磁石重量）で、現状のレアアース（ネオジム、ジスプロシ

ウム）の原料価格で十分に採算がとれる目処がついている。

これら新しいコンセプトでのレアアースリサイクルのグローバルな事業化の展開と、我が国のレアアース資源戦略の一つである備蓄がうまく融合できれば、中国のレアアース資源戦略に対抗し得る新しいレアアース資源戦略を構築できるのではないかと期待している。