

巻頭言

1 時間切れは国民への無責任

長崎晋也

時論

2 安全目標は理念を語れ

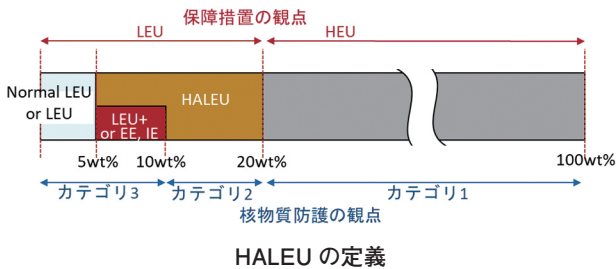
佐治悦郎

解説

12 壁を越えよ！ - 5% 超改め HALEU 燃料をめぐる最近の状況

近年、「HALEU」と呼ばれる濃縮度5%超燃料に注目が集まっている。本稿では主に米国の動向を俯瞰し、HALEUとは何か、動機と課題は何か、いま何が起きているのかを紹介する。

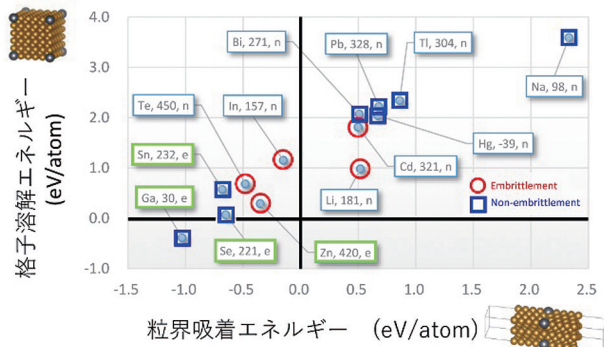
山崎正俊



17 金属格子欠陥と第一原理計算 - 粒界脆化とすべり変形について

金属格子欠陥の第一原理計算から得られる欠陥構造と原子間凝集エネルギーなどの知見は材料研究におけるミクロの極限であるが、マクロな材料物性に対して強く影響を与えている可能性がある。

山口正剛



Perspective

4 太陽光やEVの課題見据えたグランドデザインを

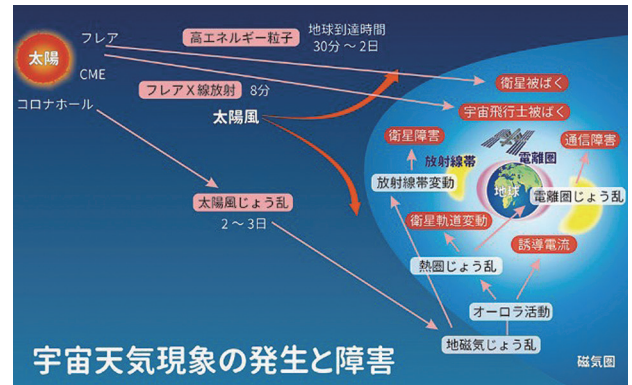
山本一郎

Science

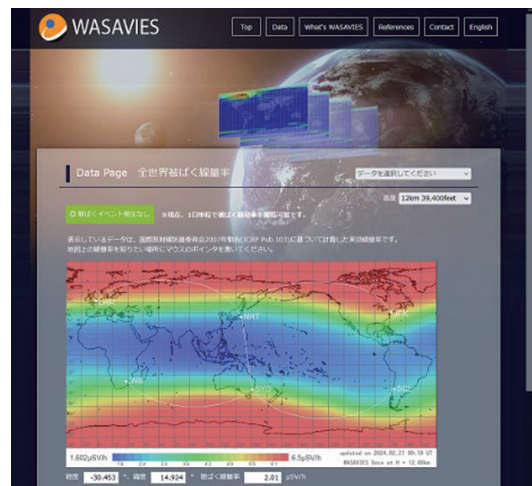
26 太陽系にも嵐が起こることを知っていますか？ ~宇宙天気予報

宇宙天気予報とは何か。宇宙環境変動による社会インフラへの影響を低減するためにどのような予報が行われ、どのように利用されているのか。

久保勇樹



宇宙天気の概念図 (情報通信研究機構提供)



宇宙天気予報のウェブサイト (同)

49 サイエンスあれこれ

秋江拓志, 笹原昭博

21 自然科学の発展をギリシャから辿る旅(I) —源流ギリシャからペルシャ・シリアを経てイスラム世界へ

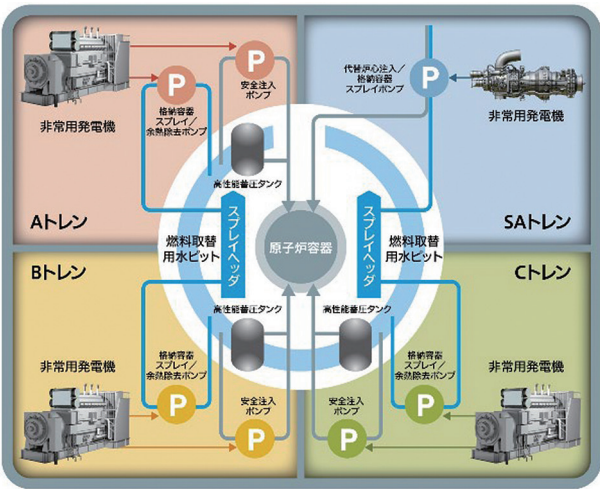
科学の源流はギリシャにさかのぼる。その知はやがてビザンチン帝国に集積し、さらにその拠点はペルシャ、メソポタミア周辺に移動。イスラム国家の驚異的な拡大の波に乗り近代科学の萌芽はやがて西欧に達していく。

吉田 正

31 次期軽水炉の実現に向けて —社会に信頼されるコンセプトと必要な取り組み

次期軽水炉の重要コンセプトの具体化と、それを実現するために必要な取り組みを検討した。

日本原子力学会 原子力発電部会
「次期軽水炉の技術要件検討」WG (フェーズ2)



多重性・多様性・独立性の強化の例
〔革新軽水炉 SRZ-1200〕パンフレットより)

46 Column

放射線の生態影響の新データと
もぐらたたきモデル (WAM) 坂東昌子
ボイジャー 1号・2号のロマンな旅 小林容子
あらためて複合災害を考える 山口克彦

若手編集委員のひとり言

48 私が考える学会誌「ATOMO Σ」の魅力

渡辺 凜

36 心理的安全性は必要：倫理学の観点から

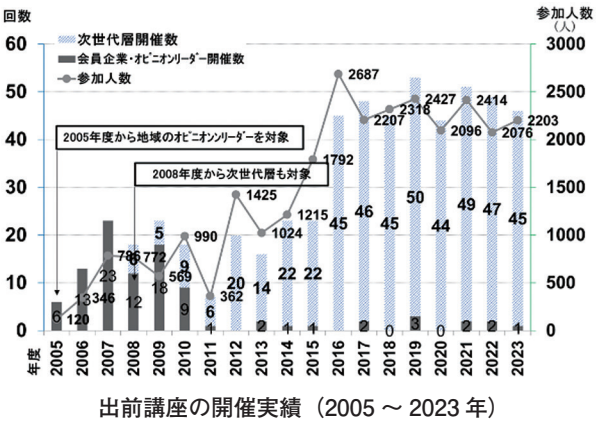
エドモンソンは言う。「率直に発言せず、安全地帯にとどまって傍観していると、自分の身は守れるが、……組織を危険にさらす事態にもなりかねない」

神崎宣次

39 日本原子力産業協会による「JAIF 出前講座」を実施してきた

次世代層を対象とした出前講座の開催回数は年間延べ40数回、2,000～2,500名。講座では「自分事として一緒に考えてもらう」ことを基本スタンスとしている。

江尻寿延, 杉山一弥, 武田精悦



Short Report

44 消費者の視点でエネルギー問題を考える—あすかエネルギーフォーラム 20年の活動から見えてきたこと

「本当のことは何か」と考え、正確な情報を得て、地域で情報発信するなどの活動を行っている。

秋庭悦子

- 6 News
- 38 From Editors
- 51 会告「第14回総会」ご通知
- 52 会報 原子力関係会議案内、人事公募、共催行事、寄贈本一覧、会費ご納入のお願い、「2024年春の年会」学生PS受賞者一覧、英文論文誌 (Vol.61, No.6) 目次、和文論文誌 (Vol.23, No.2) 目次、主要会務、編集委員コラム、編集関係者一覧
- 56 Vol.66 (2024), No.6 J-STAGE 閲覧
購読者番号・パスワード

学会誌に関するご意見・ご要望は、学会誌ホームページの「目安箱」(https://www.aesj.net/publish/aesj_atomos/meyasu) にお寄せください。

学会誌ホームページはこちら
https://www.aesj.net/publish/aesj_atomos



時間切れは国民への無責任



マクマスター大学教授

長崎 晋也 (ながさき・しんや)

東京大学大学院工学系研究科原子力専攻修士課程修了。四国電力、東京大教授を経て、2012年より現職。専門は核燃料サイクルと放射性廃棄物管理。2024年9月からは原子力規制委員会委員に就任予定。

4月8日(月)、ナイアガラの滝や赤毛のアンで有名なプリンス・エドワード島を含む北米で皆既日食が観測された。地球から38万km離れた月と、1億5千万km離れ、光ですら8分19秒もかかる太陽が織りなす天体ショーを、身長2mにも満たない人間が見ていると思うとゾクゾクともした。皆既日食は物理としてはなんでもない自然現象で、今では小学生も理解している。一方、わずか1000年前の「光る君へ」の時代では、多くの人は神や仏の御心として受け入れたと思われる。そしてその後、人類は身の回りのさまざまな現象をサイエンスとして解明しテクノロジーへと発展させ、また先にテクノロジーとして社会に実装されているものを通してサイエンスを構築してもきた。

「人類に最も影響を与えたテクノロジーは何と思うか」と、数年前にエネルギーに関する授業に出席していた40人くらいの工学部4年生に聞くとインターネットや種痘などさまざまな意見が出た。サイエンスフェアのためのプロジェクトで、最も厳しい氷河期に北米にやってきた先住民の先祖の生存確率を数学モデルで評価していた息子は、縫い針も候補だと言っていた。これで人は極寒でも耐えられる服を作れるようになったという。カナダに来てからの筆者の意見は活版印刷。それまで教会の奥に厳重に保管され聖職者というバイアスを通してのみ知り得た神の言葉を、一般市民が直接見るようになった。社会における教会の意味が全く異なるものになったといえる。

授業では、原子力エネルギーと答えた学生もいた。原子力はエネルギーと放射線の両面で社会に大きな変化を与え、リスク論などの学術の発展に貢献した。そしてテクノロジーがいわゆる旧来的技術論に留まるのではなく、経済や文明史観、文化や社会的価値観、国際政治や国家安全保障にまで関わるものであることをわれわれに示したという意味では人類社会に大きな影響を与えたテクノロジーの1つであろう。

その原子力というテクノロジーを今後どう利用するのかは、それぞれの国ごとの判断になるが、そこには現実という因子が加わる。2003年に営業運転を開始した中国の秦山Ⅲ2号機(CANDU炉)を最後に新規建設がないため人材の経験という観点から厳しいカナダは、遠隔地の先住民居住地域や北極圏内の防衛施設などで利用する小型炉を前面に出すことで現実味という味付けをしつつ、規制も含めたグローバルスタンダードへのコミットを目指す。さらにはBWRX-300を導入することで単なる資源提供国から濃縮ウラン輸出国への展開も図る。大学生や高校生は、冷徹に現実を見ている。将来に夢があるからこそ、大勢のカナダ人が原子力工学を学ぶ。大きな圧力容器を製造する技術は失っても、小さい容器なら原潜などで維持してきた米国は、小型炉開発を通して技術力を回復することで世界市場の再支配を目指した。その成果は今後出てくる。一方、1基のCANDU炉が稼働するルーマニアは、さらに2基のCANDU炉の導入を口にしてはいるが、国内で原子力工学を学んだほとんどの学生は給与の良いEU内のフランスやスウェーデンに職を求めて出ていくため、現実的には既存の1基の安全すら心もとないとも聞いた。

日本がこの原子力というテクノロジーをどうしたいのかは、カナダまでは聞こえてこない。ただ極端に単純化して、日本人の毎年の出生者数を50万人、死亡者数を150万人とすると、120年後には日本人は地球上に存在しない。だから120年何もしないで良いわけではない。3.11から20年後ですら何もないままだと、継続して利用するにしても店仕舞いするにしても国民に対し無責任すぎることは、カナダの現実からわかるし、式年遷宮という歴史と文化を知る日本人が大半と思われる原子力学会はもっと良く理解しているはず。期待したい。

(2024年4月9日記)



安全目標は理念を語れ



佐治 悦郎 (さじ・えつろう)

本会フェロー，元理事，博士(工学)
原子力安全委員会リスク情報を活用した安全規制の導入に関するタスクフォース委員，総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会リスク情報活用検討会委員等を歴任，三菱重工にて炉心技術部長，原子力事業部長代理等を務めた。

I. はじめに

安全目標の制定を目指し，継続性が期待される本会内での活動がようやく動き出したようだ¹⁾。本会 1F 事故調査委員会提言の最初の項目であり，その後のフォローアップ報告書でも取組み強化の必要性が指摘されていたところ，関係部会によるシンポジウムの開催といった単発的な活動は見られたものの継続的な取組みにはつながっていなかったため，今般の活動開始を歓迎したい。

筆者は本誌上でわが国の安全目標の現状が抱える課題を指摘してきた一人だが^{2, 3)}，本稿では上記の取組みへの一助として，安全目標制定に向けた検討を実施するうえで最も重要と考える論点の提示を試みる。

II. わが国の現状と主たる課題

まず，1F 事故前に旧原子力安全委員会安全目標専門部会(以後，簡単のため原安委という)が提案した安全目標案について概要を簡単におさらいしておこう。同案は放射線被ばくによる公衆の健康被害に着目し，定性的目標としては日常生活に伴う健康リスクを有意に増加させないレベルとし，定量的目標としては急性死亡，がん死亡ともに 10^{-6} /年を超えないように抑制すべきとした。そして，それらを発電用原子炉において達成するためのいわゆる性能目標として，炉心損傷頻度(CDF) $< 10^{-4}$ /年，格納容器機能喪失頻度(CFF) $< 10^{-5}$ /年という値を数値計算に基づく理論的根拠とともに導出した。

次に現状とそこに至る経緯について整理する。1F 事故後，新たに設置された原子力規制委員会(NRA)は事故から2年余り経った2013年4月10日に「安全目標に関し前回委員会(平成25年4月3日)までに議論された主な事項」と題したメモを公表した。それによれば，1F 事故を踏まえると「環境への影響をできるだけ小さくとどめる必要がある」ので，原安委の案に「事故時の Cs¹³⁷ の放出量が 100 TBq を超えるような事故の発生頻度は，100 万炉年に 1 回程度を超えないように抑制されるべきである(テロ等によるものを除く)ことを，追加すべきである」とした。そして最後に「今後とも引き続き検討を進めていく」と結んでいる。

この「追加すべき」とした目標は NRA 資料⁴⁾にもみられるように，CDF や CFF の目標と同列に論じられるべき性能目標だが，原安委の性能目標とは異なり，その上位にあるべき安全目標については，「放射性物質による環境への汚染の視点も安全目標の中に取り込み」という記述のみにとどまっている。また，定量値の根拠も明文化されていない(正確には，NRA 会合議事録などからその根拠の一部を読み取ることは可能だが，100 TBq はともかく 10^{-6} /炉年の根拠は明瞭とはいえない)。1F 事故を踏まえると放射線被ばくによる人への健康被害のみならず，「環境への汚染の視点」が安全目標に必要と考え提案したことは理解できるが，性能目標(NRA 資料⁴⁾)に従い，以後 CFF-2 の目標と称する)のみが提案された状態から進展がなく，その後の炉安審・燃安審への諮問や継続的な安全性向上に関する検討チームでの議論を経て，上位に位置すべき安全目標そのものの検討が深まっていない現状は，重い課題を残していると言えるのではないだろうか。

III. 理念としての安全目標

性能目標を追加するのであればその上位にあるべき安全目標はなんであるかを明確にすることが重要だ。そのことを考えるうえでの参考とするため，米国原子力規制委員会(NRC)でなされた検討をひとつ紹介しよう。

CFF-2 は事実上，米国で用いられている大規模放出頻度(LRF: Large Release Frequency)に対応している。100 TBq という値自身は大規模とはいえないが，この値を超える放出事象は実質的に大規模放出につながる事故となるからだ。LRF の目標については，1986 年の NRC 安全目標政策声明において言及があり，同政策声明で提示した安全目標(定性的目標と定量的目標からなるが，後者では急性死亡，がん死亡とも他の要因の合計の 0.1% を超えないようにすべきとされた。定量的目標は QHOs: Quantitative Health Objectives と称される)を規制において利用するための目安として $LRF < 10^{-6}$ /炉年なる general performance guideline を提案するとともに，同案について検討を深めるよう事務局(staff)に

指示を出している。それを受けた検討の経緯と結果は NRC の SECY-13-0029 に詳しいが、結論としては、 $LRF < 10^{-6}$ /炉年という性能目標は QHOs の代替目標としては桁違いに保守的 (several orders of magnitude more conservative) であり現実的でないとして採用されなかったのであるⁱ。

さて、米国の QHOs とわが国の定量的安全目標案は、その定義は異なるものの目指すリスク水準は概ね同等である。つまり、NRC の検討に基づけば CFF-2 の目標は原安委の安全目標案に対応する性能目標としては保守的に過ぎるということになる。ただし、CFF-2 の目標はそもそも安全目標案が放射線被ばくによる健康リスクのみに着目していることの不足を補う目的で提案されたものなので、より高いレベルの目標となっていることに違和感はない。

しかし一方で、1F 事故においては放射線被ばくによる急性死亡、がん死亡がともに認められていない(後者については将来の予想も含む)にも関わらず甚大な災害となったのであるから原安委の安全目標案は不十分であった、ゆえにより厳しい性能目標が必要というロジックは一見、分かりやすいが注意が必要だ。というのも、事故前の 1F は果たして原安委の性能目標案を満足していたのかという懸念が払しょくできないからである。

話を整理しよう。1F 事故を踏まえ安全目標を見直すべきとする考えには賛同できる。しかし、原安委の性能目標案より一桁厳しい(という解釈の根拠は次章で説明する)目標を上位の安全目標の議論なしに設定することはその正当性、説明性が不足していると考えられる。

安全目標はまず最上位の目標としていかなる安全を達成したいのか、それを理念として掲げ明文化すべきであり、それが定性的安全目標となる。そのうえで、それを定量化した目標を策定する。そして、実際の施設での利用を念頭においた代替目標としての性能目標がそれから導き出されるのである。

さて、1F 事故後の米国はどうしたのだろうか。それについてひとつ興味深い動きを紹介しよう。米国機械学会 (ASME) は、1F 事故を受けた ASME Presidential Task Force を立ち上げ、“Forging a New Nuclear Safety Construct” と題する数ページの文書を 2012 年 6 月に公表した。そこには、広範な社会的混乱 (extensive societal disruption) を防ぐことが新しい原子力安全の概念 (New Nuclear Safety Construct) であると記されているのだ。これこそ、まさに新たな安全目標の提案といえるだろう。ただし、NRC はこれを採用していない。

翻ってわが国の規制当局は、この ASME が提唱した

ⁱ 現在、新設炉についてはより高い安全レベルを期待する観点から、 $LRF < 10^{-6}$ /炉年の目標を採用している。

概念と同様の目標を CFF-2 の目標によって実質的に導入しようとしたと言えるだろう。であるならば、米国より一歩踏み込んだ高い目標を理念として掲げ、新たな安全目標の体系を確立することが、1F 事故を起こしたわが国のなすべきことではないだろうか。

IV. 性能目標への展開について

かつて筆者らは、「広範囲にわたる社会的混乱をもたらすリスク」に着目し、最上位の定性的安全目標に相当する概念を提案した²⁾。仮にこれと同様の最上位目標を掲げた場合、対応する性能目標を導くには定量的安全目標が必要である。この検討は容易ではないかもしれないが、かつて原安委が定量的目標案を策定する際に行った広範かつ深い議論を思い返せば不可能なことではない。また、実際にそうした検討を数値計算を交えて試みた近年の研究例も見出すことができ⁵⁾参考となるだろう。

原安委では、性能目標案を検討する際、CFF を指標として採用するに当たってはいくつかの候補 (CFF, LERF, LRF 等) を挙げて比較検討した。その際に CFF は LRF を包含しており LRF に近い値であると解説している。つまり、CFF-2(≒ LRF) は原安委の CFF と概ね同等と見なすことができる。CFF の目標は安全目標案から 10^{-5} /年と導き出されたのであるから、それを一桁厳しい値に設定し直す (CFF-2(≒ CFF) $< 10^{-6}$ /年) ののであれば、上位の安全目標の見直しを行ったうえで、そこから導出するというプロセスを経て正当化されるべきであるということを繰り返しになるが強調しておきたい。

V. 終わりに

安全目標の議論というと、すぐに何に使うのかという話が先行し、性能目標の議論ばかりに注目が集まりがちであるが、以上、述べてきた通り、まずは理念としての最上位目標を掲げたうえでなければ、適正な性能目標にたどり着くことはできない。本稿がこれから安全目標の議論を進めていかれる当事者の方々の参考に少しでもなればと願いつつ結びとしたい。

(2024 年 3 月 29 日 記)

— 参考資料 —

- 1) 本会リスク部会 2024 年春の年会全体会議資料
- 2) 山口、菅原、佐治、「安全目標」再考—わが国でのあり方を問う—、日本原子力学会誌、Vol.62, No.3, 2020.
- 3) 座談会「どうする？安全目標」、日本原子力学会誌、Vol.63, No.1, 2021.
- 4) 平成 25 年度第 1 回原子力規制委員会(平成 25 年 4 月 3 日)資料 6-2.
- 5) K. Silva, K. Okamoto, “Discussion on probability of cesium-137 release exceeding 100 TBq as a part of the consideration of nuclear power plant probabilistic risk criteria for environment protection,” Reliability Engineering and System Safety, **180**, 88-93 (2018).