



JOGMEC カレント・トピックス

独立行政法人 石油天然ガス・金属鉱物資源機構

Uranium 2020 参加報告

〈シドニー事務所 Whatmore 康子 報告〉

はじめに

Uranium 2020 カンファレンスは、大洋州鉱業冶金協会 (AusIMM) の主催により 2020 年 6 月 30 日、7 月 1 日、7~9 日の 5 日間にわたって、各日ともに COVID-19 感染防止のためオンライン形式として半日の行程にて開催された。同カンファレンスには 110 の企業や団体に所属する 230 名が参加し、現在と将来のウラン市場、原子力に関する今後の政策と戦略、ウラン市場への投資における現状、原子力テクノロジーと小型モジュール原子炉 (SMR)、ウラン探鉱へのイニシアティブの 5 項目に関するトピックについての講演が行われた。オンライン形式による今回のカンファレンスは、講演中に参加者の質問や感想、意見が共有メッセージを通じてリアルタイムに閲覧可能であるという点で、遠隔参加でありながらも通常のカンファレンスと同等、ある面においてはそれ以上の有意義な点を備えていたと思われる。以下に、主要な講演の内容に関する報告を行う。

1. 2020 年におけるウラン市場のアップデートについて

(Ms. Treva E. Klingbiel – President and principal, TradeTech LLC)

ウランのスポット価格は 2020 年 5 月 31 日の時点で 33.85US\$/lb と、2020 年初頭から 35%値上がりした。これは COVID-19 流行により、Cigar Lake 鉱山の操業休止や Kazatomprom による減産が実施されたことが影響している。

現在、世界のウラン需要は、米国や EU においては天然ガスや再生可能エネルギーの利用増加により低下しているが、中国では原子力発電所が現在稼働する 45 基に加え、COVID-19 流行にも関わらず 12 基で順調に建設が進められていることから世界全体では増加し、2035 年には 2018 年比で 17 百万 lb U_3O_8 増加すると予測されている。

一方で、現在の市場はウランの供給を促進するための条件が揃っていないことが指摘できる。例えば、米国政府は「ロシアからのウラン輸入量を国内市場における供給量の 20%以下に制限する」という Russian Suspension Agreement の期限を 2020 年末に控え、早ければ同年 8 月 4 日にもその更新の是非が決定されるが、これに伴う市場の先行き不安で米国では長期契約による購入控えが起きている。また、米国では COVID-19 流行に伴う経済低迷により電力会社が顧客から電気代を回収できずキャッシュフローが悪化しており、やはりウランの買い控えが生じている。これらの状況は、ウラン企業が鉱山の新規開発を躊躇する背景ともなっており、探鉱投資も低調な状況が続いている。鉱山開発には 10 年という長期を要するため、今後 5 年間に新規ウランプロジェクトからの生産が開始されなければ、ウラン市場の需給バランスは将来にひっ迫すると考えられ、

操業休止や減産からの回復や新規プロジェクトからの生産が無ければ、2035 年までには年間 100 百万 lb U₃O₈以上の不足となると予測している（図 1）。

以上のような状況において、豪州はウラン鉱山開発において有利な立場にある。これは、豪州におけるウラン埋蔵量が世界全体の 27%を占めているほか、豪州が政治的に安定していることや鉱業専門技術の人材が充実していることなどが理由である。また現在、世界におけるウラン供給源の 80%は僅か 8 か国によって占められており、東南アジア諸国は原子力発電のウラン調達先を少数国に依存しないよう多様化する必要があるが、豪州は東南アジアに近接しており、供給国として地理的に有利な立場にもある。一方で、ウラン鉱山の新規開発や操業再開が可能となるには、ウラン価格は少なくとも 44US\$/1b U₃O₈にまで値上がりする必要があるが、電力会社は市場の先行き不透明感や在庫が十分であることを背景にこの価格でも高いとしており、これが今後におけるウラン鉱山の新規開発の足かせとなっている。

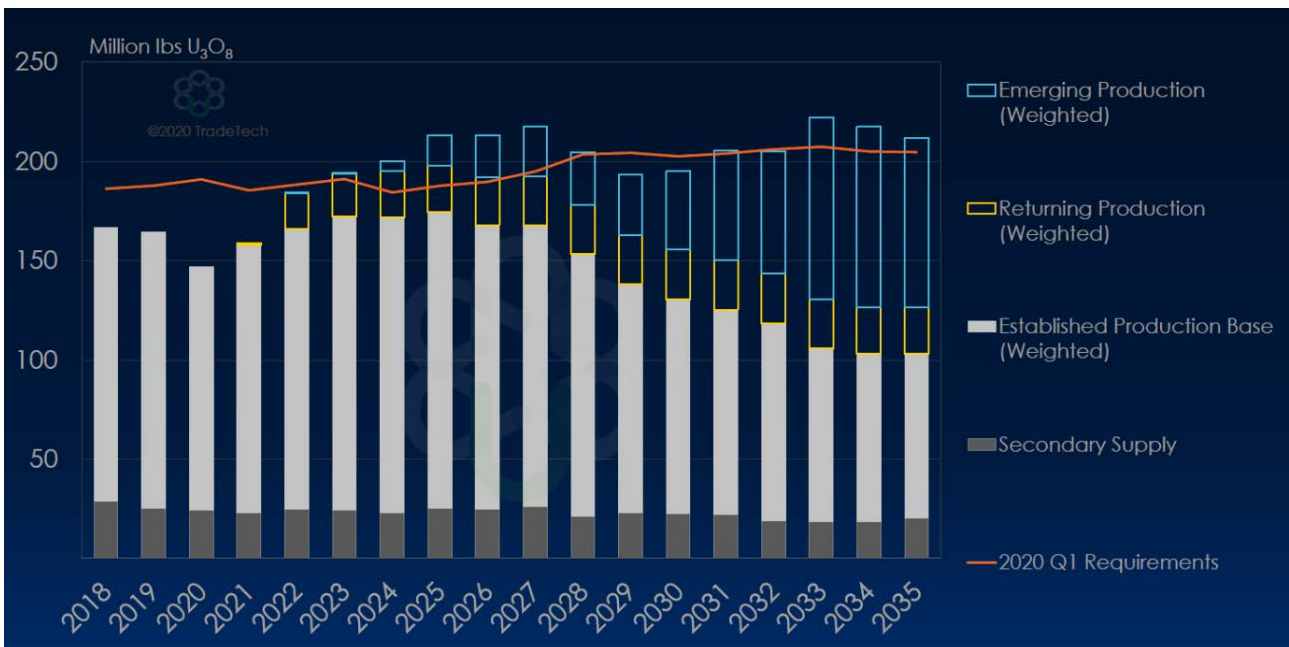


図 1. 2035 年までの需給予測図

2035 年までに、年間 100 百万 lb U₃O₈のウラン不足が生じる可能性がある。

(出典：Trade Tech 社プレゼン資料)

2. 歴史が語るウラン生産事業における成功の困難さ

(Mr. John Borshoff – Managing Director/CEO, Deep Yellow Limited)

ウラン産業は誕生してから未だ 75 年の新しい産業であるが、この間、1945～1970 年、1971～2000 年、2001～2019 年において 3 つの大きなサイクルが生じた（図 2）。最初のサイクルでは、東西冷戦による核兵器開発や原子力発電の試験的な操業を背景にウラン探鉱が開始された。第 2 サイクルでは、1971 年の石油ショックにより原子力発電が化石燃料発電の代替として進歩して探鉱とウラン利用が促進されたが、1986 年のチェルノブイリ原発事故によりウランの需要と探鉱が激減することで終了した。第 3 サイクルでは、中国政府が 2001～2005 年の第 10 次五カ年計画におい

て原子力発電を年間 30%増量するという政策を発表して以来¹ウランブームが生じ、世界ではウラン探鉱企業が大小合わせて 400 社以上設立されたが、2011 年の福島原発事故を境に 60 社以下に激減し、ウラン探鉱の専門家も急減した。そして現在では、ウラン産業が回復の兆しを見せ、第 4 サイクルが生じようとしている。

予測によると、2023 年以降はウランの需要がひっ迫してウラン鉱山開発の機会が訪れるとされている。ここで注目したいのは、過去の 3 サイクルで大きな成功を収めたジュニア企業は、加 Denison Mines 社（第 1 サイクル）、豪 Queensland Mines 社（第 2 サイクル）、豪 Paladin Resources 社（第 3 サイクル）の 3 社のみであるということだ。これは、ウラン産業が地質学、エンジニアリング、冶金、供給市場、生産物のマーケティング、環境、財務、臨界状態維持のマネジメント、政治面など様々な分野における理解を必要とし、複雑極まりない産業であるということが関係している。ウラン市場のプレーヤーは、第 1 サイクルでは政府機関や国営企業が主要を占め、第 2、第 3 サイクルでは民間大手がこれに加わったが、第 4 サイクルでも同様の状況となると予測される。ウラン市場の今後における成長幅の 70~80%はロシアや中国の国営企業、加 Cameco 社、大手企業の副産物による生産によって占められることは確かであろう。そして、残り 20~30%をジュニア企業が補完することになると考えられるが、これまでの経緯が示すように大規模なウラン鉱山の開発を達成及び管理できるジュニア企業は非常に少ないと考えられ、これが懸念材料となっている。特に次世代においては、ウランの安値により利鞘の少ない状況下で、電力会社への供給をいかに確実に行うかが重要となってくる。ジュニア企業がこれらの問題を克服し、ウラン市場で成功を収めるには、上記のようなウラン市場での過去における問題や独特の性質を十分に理解し、将来的な動きに備える必要がある。また、新興ジュニア企業は、過去における供給実績を持たずとも、電力会社に対し長期のウラン供給が可能であることを納得させることが必要となるだろう。

1 Nuclear power in China's development plans

<https://www.chinabusinessreview.com/a-boost-for-nuclear-power/>

Nuclear Cycles in History 1945-2020

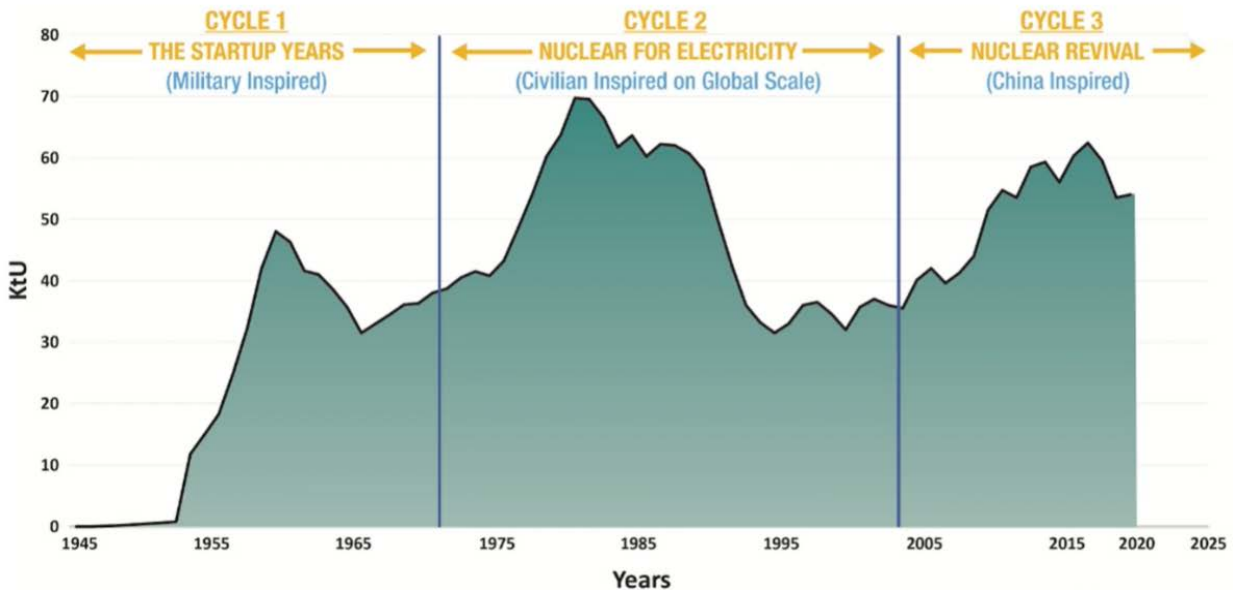


図 2. 1945 年から 2020 年におけるウラン産業の 3 つのサイクル

縦軸は、ウランの生産量を表している。

(出典 : Deep Yellow 社プレゼン資料)

3. 価格が全て

(Mr. Mike Alkin – Chief Investment Officer and Founder, Sachem Cove Partners)

世界のウラン市場で 40% のシェアを占めるカザフスタン Kazatomprom 社は、2018 年にロンドン証券取引市場に上場する際に初めて同社のウラン生産量に関する詳細を公表したが、これによると同社の生産量は 2022 年にピークを迎え、その後数年間に低下することが予測されている。また、同社は今後 10 年以上において CAPEX や探鉱費用を縮小し、生産調整を図る計画であるともされている。その一方で、ウラン需要は今後も原子力発電所の建設が相次ぐことで増加する見通しであるため、将来的にはウラン供給がひっ迫することが予測される。ウランの供給不足は、新規ウラン鉱山が操業を開始してその後も順調に操業を進めることにより埋めることが可能であるが、そのためにはウラン価格が鉱山のコスト額を上回る必要性がある。ウラン価格は現在 33US\$/1b U₃O₈ だが、45~50US\$/1b U₃O₈ まで値上がりしなければ、二次供給や国営企業の生産量を加味しても、2030 年までに累計で 600 百万 1b U₃O₈、年間で 58 百万 1b U₃O₈ の供給ひっ迫が生じると予測されている。

AISC (All-in-Sustainable Cost) が現在のウラン価格 33US\$/1b U₃O₈ を上回る鉱山の生産量は合計 105 百万 1b U₃O₈/年で、それ以下である鉱山の生産量は合計 100 百万 1b U₃O₈/年、AISC が 50US\$/1b U₃O₈ 以下の鉱山の生産量は合計 140 百万 1b U₃O₈/年であるとされている。また現在、ウラン安値を理由に操業が停止されている鉱山の名目上の年間生産量は総計 2.3 百万 1b U₃O₈/年、今後 2 年間に資源枯渇によって生じる減産量は合計 3 百万 1b U₃O₈/年で、過去の備蓄や解体された核兵器から供給されるウランなどによる 2 次供給量は 25 百万 1b U₃O₈/年となると予測される。ウラン

鉱山の操業開始には10年間という長期を要するということを加味して、この先10年間のウラン市場を予測すると、少なくとも毎年25百万lb U_3O_8 、さらにコスト高による減産や閉山を考慮に含めると、それ以上のひっ迫が生じると考えられる。供給不足はもう既に始まっており、2021年に電力会社への長期契約に基づく供給量が前年比で約30%減と大幅に低下することを皮切りに、今後5年間で著しく需給バランスがタイトになると予測される。これらの供給ひっ迫においては鉱山からの1次供給量の増加が重要となるが、そのためには上記のようにウラン価格が値上がりする必要がある。鉱山操業の新規開始や持続のためには、ウラン価格は少なくとも55US\$/lb U_3O_8 となる必要があると考えられるが、この価格でも供給ひっ迫は軽減されるのみで、需給均衡のためには65~75US\$/lb U_3O_8 となる必要があるだろう。この先10年間の供給不足は、ウラン鉱山の操業開始には10年間を要するという事実からも既に避けられないと考えられ、原子力発電企業は燃料確保のために、高値で長期供給契約を受け容れる傾向となることが予測される。

4. 豪州のウラン供給と中国需要

(Mr. Guy Keller Commodity – Specialist and PM, Tribeca Investment Partners)

豪州は、ウラン資源量が世界シェアの約30%を占め、2019年のウラン生産量は7.8千tUとカザフスタンとカナダに次いで多かった。一般に、豪州はウラン開発に対する投資環境は非常に良好であるとされているが、これは連邦政府に対する評価であり、個々の各州における事情はそれぞれ異なる。例えばSA州政府はウラン採掘には担当大臣の認可を必要とするが、基本的に賛同の姿勢を取っている。一方、VIC州政府は州法(Nuclear Activities (Prohibitions) Act 1989)によってウラン開発を完全に禁止しており、NSW州政府も採掘は認めているが、採掘は副産物としてのみと州法で定められている。また、WA州とQLD州は、ウラン開発を禁じる州法は特に存在しないが政府の方針による影響が大きく、現政府の政策により採掘が禁止されている(図3)。この状況に関しては、QLD州で2020年10月、WA州で2021年3月に州選挙が実施されるため、政権が交代すれば新たな変化が生じる可能性がある。

豪州ではこれまで、ウラン採掘や原子力発電の規制を緩和するための見直しが連邦政府や州政府によって数回行われており、これらの大半においてはこれといった改革も行われなかったが、2019年にVIC州政府、NSW州政府、連邦政府がそれぞれ行った見直し調査²では、規制緩和に前向きな結果や、世論からの好反応が得られている。また、豪連邦政府はCOVID-19流行後の経済刺激政策を実行する計画であるが、ウラン産業はこの政策に乗り、同産業が炭素排出量ゼロやベースロード発電というメリットを備えているうえ、GDPへの貢献度も高いことをアピールする機会が生

2 VIC州政府がウラン開発の解禁に関する調査 Nuclear prohibition inquiry を2019年11月に開始。

https://www.parliament.vic.gov.au/images/stories/committees/SCEP/Inquiry_into_Nuclear_Prohibition_Inquiry_/Media/6_NOV_2019_Nuclear_prohibition_inquiry_launched.pdf

NSW州政府が2019年6月6日にウラン採掘と原子力施設を禁止する法律 Uranium Mining and Nuclear Facilities (Prohibitions) Act 1986 の廃止草案に対する調査を開始。

<https://www.parliament.nsw.gov.au/committees/inquiries/Pages/inquiry-details.aspx?pk=2525>

豪連邦政府が2019年8月に豪州における原子力エネルギーの前提条件 (prerequisites for nuclear energy in Australia) の調査を開始。 <https://www.aph.gov.au/nuclearpower>

じている。

需要面においては、中国における原子力発電所の操業や建設の順調な継続が、豪州におけるウラン産業の駆動力となるだろう。中国では現在 47 基の原子炉が稼働し、2019 年のウラン需要は 25 百万 lb U₃O₈/年とされるが、今後予定される原子炉建設で 2025 年には 42%増の 35 百万 lb U₃O₈/年、2030 年には実に 300%増の 75 百万 lb U₃O₈/年に増加する見通しであるとされる。

その一方で供給面は現在、COVID-19 流行により月間供給量の 50%以上が減産となるなど、原子力発電企業が供給源を特定の国や地域に依存することが危険であることが明らかとなっている。豪州ではこの状況において、ウラン産業がロビー活動を行い、ウラン開発への規制を緩和するよう連邦・各州政府に働きかけていく時代が来ていると言える。

The Law – Varies By State

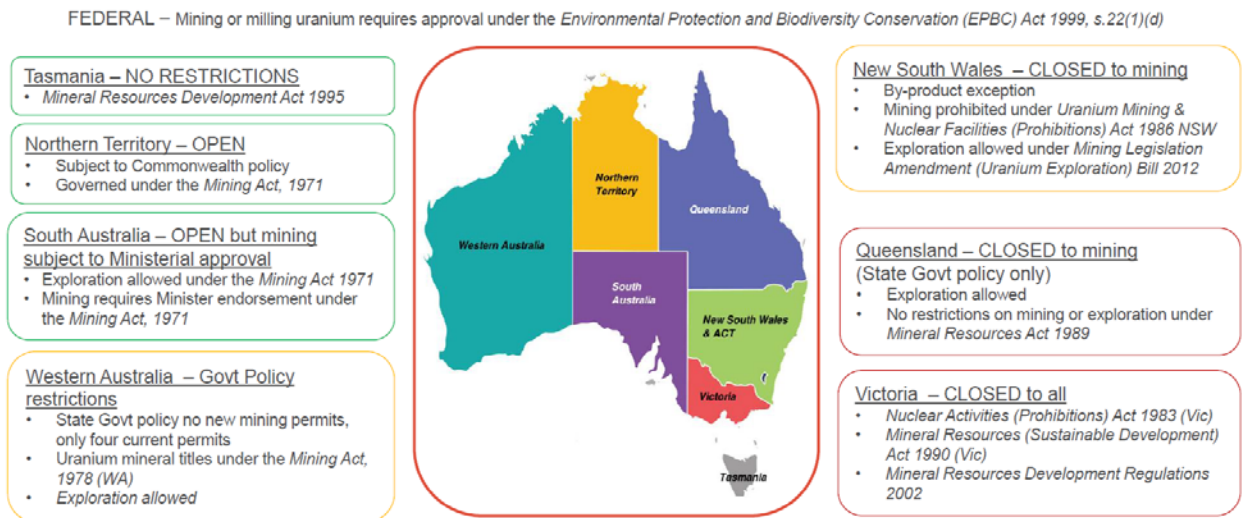


図 3. 豪州連邦・州政府におけるウラン鉱業政策について

(出典：Tribeca 社プレゼン資料)

5. 豪州の原子力テクノロジー政策

(Ted Obrien MP – Chair of the House of Representatives Environment and Energy Committee)

豪州では、1998 年に豪連邦政府によってモラトリアムとされて以来、原子力発電所の建設や操業が禁止されており、原子力に対する一般的なイメージもチェルノブイリや福島原発事故など否定的なものが主流であった。だが最近では、気候変動の問題やテクノロジーの発達によってこの風向きが変わってきている。原子力発電は発電時の温室効果ガス (GHG) 排出が無く、国連の気候変動に関する政府間パネル (IPCC) によって、GHG 排出を緩和する発電システムであるとされている。また、原子炉はテクノロジー面において小型モジュール原子炉 (SMR) など、第 1~第 3 世代よりもはるかに安全性や建設面で優れた第 3+世代に移行しており、将来的には第 4 世代へと移行する。豪連邦政府はこれらの動きに鑑み、2019 年 8 月に与野党で構成される環境エネルギー常

設委員会 (Standing Committee on the Environment and Energy) が豪州における原子力エネルギー利用の前提条件に関する調査を実施し、同年 12 月に発表したこの調査の報告書で以下の 3 つの提言を行った。

- 1) 原子力エネルギーを豪州の将来的なエネルギーミックスの一つとして検討する
- 2) 原子力発電について理解を深めるため、テクノロジーや経済性に関する調査などの作業を進める
- 3) モラトリウム分野やテクノロジーの種類に関して一定の制限を設け、原子力利用を進める。

これらの提言においては、安価なエネルギーの安定的調達や GHG 削減を優先し、原子炉を導入においては SMR など第 3+ 世代以降のテクノロジーのみを利用することなどが重要視されたほか、原子力利用を発電だけでなく医療なども含め体系的かつ戦略的なものとすることや、コミュニティと人々を最重要視する点なども掲げられた。

豪州では過去 12 か月間において、上記のように気候変動や原子力テクノロジーの飛躍的な発展を背景に、原子力エネルギー利用に関する論議が大きく進歩した。しかしながら、この論議は、例えば政治的にはモラトリウム解除においては与野党の意見一致が必要とされるなど、長い道のりを要するだろう。豪州政府が原子力の利用を決定するにしても、それは 10 年を要し、2030 年以降となることが予測される。

6. 原子力発電における科学の利用 (Mr. Adi Paterson – CEO, ANSTO)

原子力テクノロジーは近年飛躍的な発展を遂げており、SMR を含む現在の第 3+ 世代を経て、更に技術が進んだ第 4 世代へと入ろうとしている。未来の原子力エネルギーは、コンパクト性、工場での組み立て、建設の短期化、地下への設置、パッシブセーフティなどの特徴を備えたものとなる。SMR は最大容量で 300MW、小型のものは 70MW 以下と 30MW 規模の風力発電プラント 2 基分に相当するコンパクトな設計であるが、非常に強力なパッシブセーフティ機能を備えており、次世代における原子力発電の主流となるだろう。パッシブセーフティとは、原子炉自体に安全装置が備わっており、発電所の保安をオペレーターに頼らずに確保することが可能な「内在的保安」のことである。SMR の開発により、原子力発電所は保安面や社会面での受容に大きな変化が生じると考えられる。

原子力発電は、炭素排出量がゼロに等しく発電燃料としての効率性が高い面から、再生可能エネルギーとの併用が理想的とされる。例えば、風力タービンの発電容量は 1 基につき 1~2MW で、1 タービンの重さは約 176t である。これらのタービン 1 基の 1 日における発電量をリチウム電池に蓄積すると、196t というタービン以上の重さの電池が必要となり、コスト効率が悪い。また、豪州人の 1 日における電力消費量は平均 8.5kWh だが、この電力量を石炭火力発電する場合、3kg の石炭が必要とされる。一方、これと同等の電力を原子力発電で行えば、これに必要なとされるウランはわずか 15mg である。このように、原子力発電が効率的である点は、今も過小評価されている。

世界エネルギー機関 (IEA) の調べによると、2017 年に世界の発電量で各発電源が占めた割合は、石炭 44%、天然ガス 23%、原子力 13%、水力 7% であり、太陽光・潮力・風力は合計 4% と非常

に少なかった。これに基づくと、炭素排出の削減が達成されるのは遠い将来であると予測されるが、世界の多くでは 2030 年を GHG 排出量削減の目標値達成における時期としており、これが目の前に迫っている。この状況において、発電源を再生可能エネルギーや蓄電池のみに依存することが上記の理由からも現実的でないことから、原子力発電の GHG 排出削減における貢献やコストなどについての具体的な論議を、早急に始める必要がある。

7. 豪州における小型モジュール原子炉

(Mr. Tony Irwin - Technical Director, SMR Nuclear Technology)

現在、世界で建設されている原子力発電所の数は 54 基であり、発電規模は平均的なもので 1,100MW、場所によっては 1,700MW のものとなるが、これらの規模において 3 つの問題が付随する。その 1 つ目は、当初の CAPEX が大きいということである。英国の Hinkley Point C 発電所を例にとると、その額は約 25bUS\$ である。2 つ目は、建設期間が平均で 5 年間以上と長いことである。そして 3 つ目は、送電網への供給に関する問題である。豪州では、発電所から電力供給先への送電線が最長 4 万 km と非常に長く、送電能力量は多くても 750MW 程度となり、通常の原子力発電所では送電能力量に対して過大規模となってしまう。

以上の点からも、豪州では現在、発電容量が 300MW 以下の小型モジュール原子炉 (SMR) に政府やメディアの関心が寄せられている。SA 州政府が 2016 年に行った調査では、SMR がコスト面でメリットが大きいという結果が得られており、NSW 州政府が 2000 年 3 月に発表した調査報告書でも、SMR が豪州の環境下においても適切であり、発電時の発熱を海水淡水化に利用するなど多目的利用が可能であるという点でメリットが高いと提言された。

SMR はもともと、原子力潜水艦や砕氷船で使用されることを想定したものであるが、小型モジュールであるため工場での組み立てが可能であり、品質の確実性が高い。SMR は、二酸化炭素排出量が 12kg/MWh と風力と同等であり、太陽光よりも少ない上、発電出力の安定性が 90~95% と高い。また、SMR は必要とされる核燃料の量が少ないことから地中に原子炉を建設することが可能であり、発電所の外側に緊急避難ゾーンを併設せずとも防護性を備えているため、用地の選択肢が広い。また、SMR は燃料補充においても、所要時間は 1 原子炉につき 1 時間程度で、その間は他の原子炉が引き続き稼働するため、シャットダウンをする必要がない。

SMR はこれらの要素に基づき、豪州においては小規模な送電網システムやディーゼル発電が高コストである遠隔地に適していると考えられる。また、豪州では 2030 年代に多くの石炭火力発電所が寿命を迎え閉鎖されることから、これらの発電所に替わるものとして利用されるポテンシャルも備えている。

8. 地質学的観点におけるウラン探鉱の将来

(Mr. Andy Wilde - Chief Geologist, Deep Yellow Ltd.)

世界のウラン市場は今後、供給ひっ迫が生じ、2040 年には 160~260 百万 lb U_3O_8 の供給不足となると予測され、新規ウラン鉱床の発見が必要とされている。ウラン探鉱には、地質学、鉱業、冶金、環境、経済などの総合的な情報を備えた「Geometallurgy」の知識が重要となるが、現在はウラン専門の地球科学技術者など、これらの知識を備えた専門技術者が不足している上、その育

成も遅れている。この背景には、1983年のチェルノブイリ原発事故によってウラン価格が急落し、1985～2005年にウラン投資が激減したことがある。

ウラン探鉱においては、機械と人間との共同作業によって有望地の抽出を行うことが、今後更に重要となるだろう。これらのテクノロジーには、低コストで地球化学データの収集がリアルタイムで可能な携帯型蛍光 X 線分析装置 (XRF) や、これを補完する役割を果たす携帯型レーザー誘起ブレイクダウン分光分析装置 (LIBS) などの例が挙げられるが、特に重要なのはマシン・ラーニングや AI の活用である。

探鉱においては、限られた予算内で利益性を高めるために、膨大なデータを統合して分析して大陸規模の大掛かりな有望地抽出を行うことが重要とされるが、その分析に近年発展の目覚ましいマシン・ラーニングや AI を活用することが非常に有用である。この 5 年間で、マシン・ラーニングや AI による探鉱を行うスタートアップ企業が世界中で 9 社誕生しているが、残念ながらいずれもウランはターゲットとされていない。一方で豪州では銅金鉱化を対象とし、豪 OZ Minerals 社や SA 州政府がマシン・ラーニングや AI を活用した有望地抽出の提案を競うコンテストを実施しており、特に OZ Minerals 社のコンテストには 1,000 人以上の参加者があり、400 以上の有望地が発見されるという成功を収めた。

今後のウラン産業の発展に向け、経済・探鉱知識に特化した地質学の学位の設置などを通じて地球科学技術者の育成を行うことや、最新テクノロジーを駆使してグラスルーツ探鉱の発見確立を挙げることで、ウランに関する Geometallurgy のモデル確立に向けた取り組みを行うことなどが重要と思われる。

おわりに

本カンファレンスは、ウラン市場や原子力に関する政策、技術、探鉱など幅広いトピックを扱ったものであったが、各講演において、専門的な情報を具体的な事例を挙げて理解し易く説明されており、これらのトピックを相関的に捉えることが可能となる構成であった。特に、これらの講演に基づき、世界で多くの国々や地域が GHG 排出量削減の目標達成年と定める 2030 年が 10 年後に迫る中、二酸化炭素の排出がほぼゼロであることや SMR などの技術革新などから原子力発電への関心が高まる一方で、新規鉱山の操業開始までに必要な年月として 10 年先を見据えることが必要なウラン産業では既に供給ひっ迫が生じ始めているという現状があり、今後もウラン産業や市場の動向を注視する必要がある。また、本カンファレンスでは COVID-19 流行により不測の影響がウラン産業やウラン市場に生じたという指摘も多かったが、これに鑑みて予測や分析におけるシナリオの範囲を広げることも重要である。

おことわり:本レポートの内容は、必ずしも独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構としての見解を示すものではありません。正確な情報をお届けするよう最大限の努力を行っておりますが、本レポートの内容に誤りがある可能性もあります。本レポートに基づきとられた行動の帰結につき、独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構及びレポート執筆者は何らの責めを負いかねます。なお、本資料の図表類等を引用等する場合には、独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構資料からの引用であることを明示していただきますようお願い申し上げます。