

新型炉部会セッション

社会動向を踏まえた新型炉開発の価値

Value of Advanced Reactor Development Based on Social Trends

(2) 再生可能エネルギーと共存できる新型炉によるカーボンニュートラルへの貢献

(2) Contribution to carbon neutrality by advanced reactors that can coexist with renewable energy

*大野 修司¹, 山野 秀将¹¹ 日本原子力研究開発機構

1. はじめに

2020 年 10 月、総理大臣所信表明演説にて、日本政府は「2050 年までに温室効果ガスの排出を全体としてゼロにする」方針を宣言し、「省エネルギーを徹底し、再生可能エネルギー（再エネ）を最大限導入するとともに、安全最優先で原子力政策を進めることで、安定的なエネルギー供給を確立」すると表明した。そして、2021 年 4 月、地球温暖化対策推進本部の会議にて、2030 年に向けた温室効果ガスの削減目標について、「2013 年度から 46%削減することを目指し、さらに、50%の高みに向けて、挑戦を続けていく」と表明した。これは、2013 年度から 26%削減するとした 2015 年パリ協定後に国連に提出した目標を大幅に引き上げることであり、我が国が世界の脱炭素化をリードしていきたいという狙いがある。

この表明を受けて、2021 年 10 月、第 6 次エネルギー基本計画において、2030 年度の電源構成は再エネを 36～38%程度、原子力を 20～22%程度を見込んでおり、残りを天然ガスや石炭といった火力とする計画である。火力発電については、太陽光発電や風力発電のもつ再エネの変動性を補う調整力として活用しつつ、2050 年カーボンニュートラルに向けて火力発電の比率をできる限り引き下げる方針である。原子力については、「水素製造を含めた多様な産業利用が見込まれ、固有の安全性を有する高温ガス炉を始め、安全性等に優れた炉の追求など、将来に向けた原子力利用の安全性・信頼性・効率性を抜本的に高める新技術等の開発や人材育成を進める」と記述され、具体的には、「革新的な原子炉開発を進める米国や欧州の取組も踏まえつつ、国は長期的な開発ビジョンを掲げ、民間は創意工夫や知恵を活かしながら、多様な技術間競争と国内外の市場による選択を行うなど、戦略的柔軟性を確保して進める」としている。

国外に目を転じれば、欧州委員会は、2022 年 7 月、原子力と天然ガスによる発電を一定の条件のもとで脱炭素に役立つ持続可能なエネルギーとして「EU タクソノミー」と呼ばれる新たな基準に含めることを承認し、脱炭素に向けて投資を促すことを狙っている。また、欧米諸国では、再エネと共存できる新型炉概念を創出するなど新型炉開発が活発になってきている。

我が国においても、2050 年カーボンニュートラルに向けて持続可能な脱炭素社会を実現するためには、電力部門において再エネと原子力発電のゼロ・エミッション技術を最大限活用していくことが急務であり、加えて、産業・民生・運輸といった非電力部門において省エネルギー化や電化を進め、エネルギーシステムのイノベーションを図っていく必要がある。本講演では、変動性再エネの導入拡大に伴う調整力の重要性を述べたのち、再エネと共存できる新型炉システムについて国内外の開発動向を紹介する。

2. 調整力の重要性

太陽光や風力など変動性再エネは発電量が季節や天候に左右され、需要と供給のバランスが崩れると、大規模な停電などが発生するおそれがある。最近でも供給力不足により電力予備率が 3%を切りそうになるという厳しい状況がよく報道されている。また、電力消費地から遠い北海道や九州が再エネの適地であり、導入拡大が進んでいるが、電力供給の不安定を避けるため九州では出力制御が行われている。そこで、地域間の電力需給バランスを解消するため、地域間連系線を増強する計画があるが、それだけでは解決できない。再

*Shuji Ohno¹ and Hidemasa Yamano¹¹Japan Atomic Energy Agency

エネを大量導入し主力電源化していくためには、不安定な発電量をカバーすることのできる別の電源、つまり適切な「調整力」の確保が不可欠である。

図1は、2017年4月30日の九州地方の電力の需要と供給を示したものである[1]。太陽光発電によって、昼間には最大で需要全体の約7割を賄うことができているが、電力の需要は、真夏の昼～夕方や真冬の朝夕の時間帯にピークを迎えるため、揚水動力や火力発電によつて的確に対応している。しかし、今後、再エネが大量に導入されると、こうした時間帯に電力不足に陥るおそれがある。一方、暖房や冷房の需要が少ない春や秋、それも工場が休みになっていることの多い休日などは、電力需要は年間のピーク時の半分程度になる。しかも春の昼間というのは、天候に恵まれれば、太陽光発電が年間でもっとも発電する時期である。日本の卸電力市場（JEPX）の取引量は、小売全面自由化当初（2016年4月）では総需要の約2%であったのに対し、2021年には40%を超えるほどの水準になっており、太陽光発電が最も発電する時期の昼間には0.01円/kWhになることが頻繁になっている。

このような昼間の時間帯に売電せず、電気を貯めておき、夕方のような必要な時に放電することができる蓄電池は最も期待される調整力である。ただし、蓄電池は、最近下落傾向にあるもののコスト面に課題がある。今後、大容量蓄電池の開発が期待されるが、デジタル化や電気自動車の普及拡大によって需要が高まっており、蓄電池だけで調整力を期待するのは限界がある。また、蓄電池にはレアメタルを使用しており、そのほとんどを輸入している我が国はその安定調達にリスクがあることも留意が必要である。これらを踏まえて、再エネ主力電源化に向けて、蓄電池以外の調整力を確保していくことが肝要である。

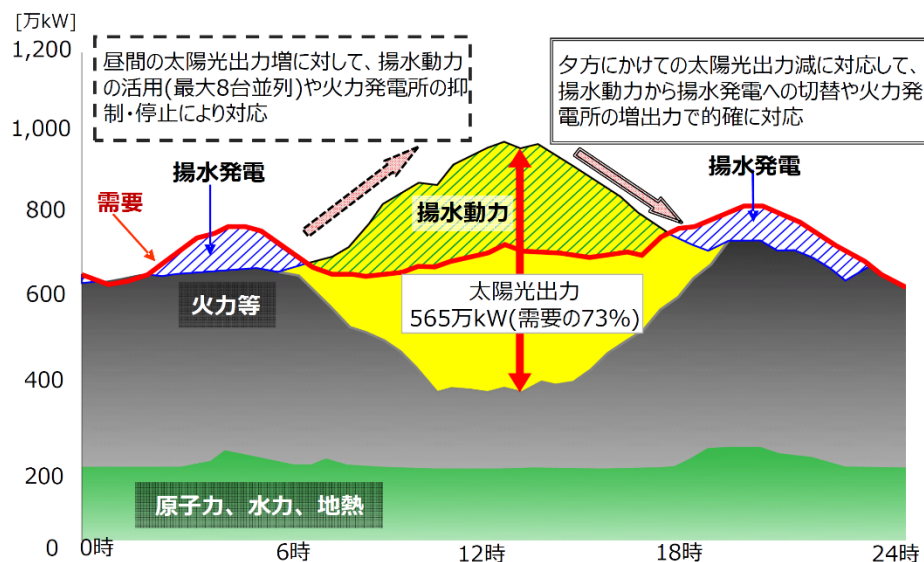


図1 2017年4月30日の九州の電力需給実績

(出所：資源エネルギー庁 https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/qa_syuturyokuseigyo.html)

将来、変動性再エネ割合が40%を想定すると、不足電力が1日に最大35～90GWh規模で発生することが試算されている[2]。すなわち、90GWh規模の蓄電容量を確保する必要がある。リチウムイオン電池を用いた大容量蓄電池システムは、国内では0.7GWhの設備導入が計画されている。蓄電池の今後の導入拡大を期待するにしても、大容量蓄電池及び一般水力の揚水化拡大だけでは不足電力を補うことはできない。様々な技術によって調整力を確保することが重要である。

3. 再エネと共存できる新型炉システム

3-1. 負荷追従能力

原子力発電は火力発電に比べて発電コストにおける燃料費の比率が小さい。そのため、我が国では、原子力発電はベースロード電源として火力発電のように負荷追従運転をしてこなかった。しかし、技術的には日

間や週間の長期的な電力需給の補完や1次や2次調整力の提供による電力系統の安定性確保を目的とした負荷追従性能を有する。実際に、電源構成に占める原子力発電の割合の高い仏国、電源構成に対して出力変動する再生可能エネルギーの割合が高い独国ではすでに原子力発電が日常的に負荷追従運転を実施している。負荷追従における技術的課題は国外では解決済みであり、国内導入も問題ないとみられる。また、欧米では負荷追従運転が事業者から設計要求されており、新型炉システムも設計対応によって将来には負荷追従運転性能を有する必要がある。

3-2. 熱供給範囲

原子力プラントは一般に発電向けであるが、世界的には、70基もの原子炉が様々な熱利用分野（コジェネレーション）において利用されている[3]。熱利用範囲は、5～240 MWth/基で、原子炉の熱利用割合は全体量に比べて僅か(<1%)であって、その利用は地域暖房、蒸気供給及び海水淡水化に限定されている。

軽水炉及び第4世代原子炉の供給温度域は以下のとおりである。

- ✓ 軽水炉 (BWR, PWR, SMR), 280-300℃
- ✓ ナトリウム冷却高速炉 (SFR), 500-550℃
- ✓ 鉛冷却高速炉 (LFR), 480-570℃
- ✓ 超臨界圧軽水冷却炉 (SCWR), 510-625℃
- ✓ 熔融塩炉 (MSR), 700-800℃
- ✓ ガス冷却高速炉 (GFR) 約 850℃
- ✓ 高温ガス炉 (HTGR), 750-950℃

軽水炉に比べて、上記の第4世代原子炉で代表される新型炉は供給温度域が高く、熱エネルギーの利用価値が高い。

3-3. 調整力として期待される原子炉システムに関する議論

マサチューセッツ工科大学と東工大を始めとする日米共同研究の2017年報告書[4]では、熱貯蔵設備の建設コストが蓄電設備の建設コストよりもはるかに安価であるとの試算結果に基づき、原子炉と熱貯蔵装置を接続させ、原子炉の定格出力運転を維持したまま、再エネの出力変動に伴う要求に応じて電力提供を可能とする以下のシステムが提案された。

- ✓ 蒸気発電サイクルを用いた原子力発電プラントと熱貯蔵設備（スチームアキュムレータ、顕熱蓄熱型、氷蓄熱型、充填層型、高温岩体型）から構成されるシステム
- ✓ 耐火煉瓦抵抗加熱式エネルギー貯蔵設備について、安価な余剰電力を用いて耐火煉瓦を高温に熱し、必要に応じて高温の耐火煉瓦に空気を吹き込むことで貯蔵熱を回収し、発電に利用するシステム
- ✓ 炉心の蓄熱容量を活用した高温ガス炉ガスタービン発電システム
- ✓ 高温炉とプレートンサイクル発電設備、耐火煉瓦抵抗加熱式エネルギー貯蔵設備から構成されるシステム

2018年10月、IAEAでは、Technical Meeting on Nuclear-Renewable Hybrid Energy Systems for Decarbonized Energy Production and Cogenerationを開催し、各国における原子力-再エネ共存システムについて紹介され、開発資金や戦略、計画管理、技術的な課題が議論された[5]。これを契機に、世界中で原子力-再エネ共存システムの検討が進むことが期待される。

我が国では、日本機械学会動力エネルギーシステム部門「原子力・再生可能エネルギー調和型エネルギーシステム研究会」（2019年4月～2021年3月）が、「2050年温室効果ガス排出実質ゼロを達成するための意見書(2021年3月9日)」を公表し、蓄エネルギー技術の確立と調整力に富んだクリーンな安定電源の確立を提言している。ゼロ・エミッション安定電源である原子力発電のより積極的な活用も重要であると述べ、原子力・再生可能エネルギー調和型エネルギーシステムの有用性を主張している[3]。

4. 国内外の新型炉開発動向

4-1. 蓄熱設備を有する新型炉

米国では、テラパワー社と GE 日立ニュークリア・エナジー社が電気出力 345MWe の小型モジュラー型ナトリウム冷却高速炉 PRISM と蒸気タービン発電設備、熔融塩蓄熱設備を接続し、原子炉出力一定のまま、再エネの出力変動に伴う要求に応じて変動した電力を提供するシステムを共同で開発している[6]。

我が国では、JAEA が中心となってナトリウム冷却高速炉を開発してきた。最近では、熔融塩蓄熱を組み合わせ、蒸気発生器におけるナトリウム-水反応の可能性を排除するとともに、浮体免震設備により耐震性を向上させ、安全性と経済性を有した小型炉概念を検討している[7]。蓄熱設備により原子炉出力 100%のまま電気出力を変動可能にし、夕方に売電量を増やすことで収益性を向上できる。熔融塩蓄熱設備は海外の太陽熱発電で実用化済みであり、ナトリウムと熔融塩の熱交換設備のみが機器開発の課題である。

蓄熱型高温ガス炉は、東芝エネルギーシステムズ（株）と富士電機（株）が開発を進めている[8]。JAEA の試験研究炉 HTTR の実績を踏まえて、技術開発課題を極力少なくして、実用化済みの蒸気タービンを採用して早期実用化を目指したものである。

蓄熱型熔融塩炉は、カナダ Terrestrial Energy 社がフッ化物熔融塩を液体燃料として使用し、二次系熔融塩ループを用いて、蓄熱技術により発電量の調整や多様な熱利用が可能である[9]。英国 Moltex Energy 社も蓄熱型熔融塩炉の開発を進めている[10]。

4-2. 水素製造設備を有する新型炉

第 6 次エネルギー基本計画では、水素を新たな資源として位置付け、社会実装を加速することとしている。発電部門ではガス火力へ水素混焼や水素専焼を推進し、運輸部門では燃料電池自動車の普及と水素ステーションの整備を推進する方針である。産業部門や民生部門でも活用範囲を広げ、水素利用を拡大させる方針である。諸外国でも、2020 年頃に水素の国家戦略が策定されるなどして世界中で取り組みが本格化している[11]。

原子炉を用いた水素製造技術には、以下に示す様々な手法があり、電気に加えて水素も併給できる[12]。

- ✓ 原子炉で発電した電気を用いた低温電気分解法
- ✓ 原子炉で発電した電気と供給した 750-850℃の熱を用いた高温水蒸気電解法
- ✓ 原子炉で供給した 850-950℃の熱を用いた化石燃料やバイオマスの化学改質
- ✓ 原子炉で発電した電気と供給した 850-950℃の熱を用いた熱化学水分解法やハイブリッド水分解法

例として、米国では、NuScale 社が、小型モジュラー型軽水炉と蒸気タービン発電設備、高温水蒸気電解法による水素製造施設等の熱利用施設を接続し、電力系統や熱利用施設の要求に応じて、原子炉出力や蒸気タービン発電設備への供給蒸気量を調整することで電力系統における再生可能エネルギーの出力変動を補完可能なシステムを開発している[13]。

我が国では、JAEA が中心となって高温ガス炉を開発してきた。HTTR により安全性実証試験を実施するとともに、連続水素製造試験装置によって実用機器の信頼性と性能の確証を行っている（2019 年には最大 30L/h で 150 時間の連続水素製造に成功）。HTTR と接続させて水素製造技術を実証するため、2022 年から三菱重工業（株）と共に実証試験を進めている。

中国では、100L/h の製造規模を目指したパイロットプロジェクトに成功しており、600MW 級高温ガス炉での水素製造技術の確立を視野に入れている[14]。

高速炉でも水素製造は可能であり[15]、原子力による水素製造が期待されている[16]。

5. おわりに

「グリーン成長戦略」では、「2050 年の電力需要は、産業・運輸・業務・家庭部門の電化によって、一定程度の増加を要する」と認識されており、「2050 年にカーボンニュートラルを実現する上では、電化の進展により約 3～4 割電力需要が増加することが見込まれる」とも記述され、変動性再エネ大量導入に対応する調整力はますます重要になると想定される。さらに、「電化で対応できない熱需要には、水素などの脱炭素燃料」

を活用することも想定されている。負荷追従能力を有する原子力は柔軟性に富んでおり、2050 年カーボンニュートラルに向けて必要不可欠な技術である。

日本政府はグリーントランスフォーメーション（GX）を推進し、温室効果ガスを発生させないグリーンエネルギーに転換することで、産業構造や社会経済を変革し、成長に繋げようとしている。再エネと共存できる新型炉はカーボンニュートラルに貢献できる技術であり、政府によって技術開発が後押しされ、早期実用化と社会実装が進むことを期待する。

参考文献

- [1] https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/qa_syuturyokuseigyo.html
- [2] <https://www.jsme.or.jp/pes/Research/A-TS08-12/Y2021-2.pdf>
- [3] <https://www.jsme.or.jp/pes/Research/A-TS08-12/210906.pdf>
- [4] <https://energy.mit.edu/wp-content/uploads/2017/12/MIT-Japan-Study-Future-of-Nuclear-Power-in-a-Low-Carbon-World-The-Need-for-Dispatchable-Energy.pdf>
- [5] <https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE-1885web.pdf>
- [6] <https://www.terrapower.com/our-work/natriumpower/>
- [7] <https://www.jaea.go.jp/04/sefard/faq/files/material0601.pdf>
- [8] <http://www.aesj.or.jp/division/ard/documents/AESJ-2021A-ARD-2.pdf>
- [9] <https://www.terrestrialenergy.com/technology/molten-salt-reactor/>
- [10] <https://www.moltexenergy.com/enables-renewables/>
- [11] https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/genshiryoku/kakushinro_wg/pdf/001_06_00.pdf
- [12] Yan, X., R. Hino, (2011), Nuclear Hydrogen Production Handbook, ISBN 978-143981083-5, CRC Press, USA
- [13] <https://www.nuscalepower.com/environment/clean-hydrogen-production>
- [14] https://energyiceberg.com/ten-chinese-green-hydrogen-companies/#CNNC_Nuclear_Giants_Power-to-Gas
- [15] https://atomica.jaea.go.jp/data/detail/dat_detail_03-01-07-01.html
- [16] https://www.jstage.jst.go.jp/article/hess/28/2/28_29/_pdf/-char/en