

FAPIG

THE FIRST ATOMIC POWER INDUSTRY GROUP

198

FEBRUARY
2024





FAPIG

THE FIRST ATOMIC POWER INDUSTRY GROUP

2024 - 2 / 令和5年度 第1号

No. **198**

目 次

- 解 説
核融合発電を取り巻く足下の動向…………… (3)
間宮陽平

- 紹 介
ICP-MS/MS を用いた ³⁶Cl の迅速分析手法の開発…………… (9)
関根伸行 / 見上 寿 / 平田一堯
地熱探査におけるシミュレーション・AI技術の適用…………… (13)
小高敏裕 / 栗林壮太郎 / 清水俊宏

- グループ情報
FAPIG の機構…………… (20)

表紙デザイン：河野亮平

子どもたちに誇れるしごとを。

いつの時代も変わることはない、子どもたちが空想する夢の世界。「こんなものがあつたらいいな」「いつかきつとつくりたい」

私たちの夢や希望は、自然の中で身近な道具を使ってカタチにしたあの頃から、少しも変わることがありません。

ずっと思い描いてきた未来を建造物に込めて、次の世代に伝えていく。

それが、私たち清水建設の「しごと」です。



核融合発電を取り巻く足下の動向

The Current Trends Surrounding Fusion Power

間 宮 陽 平*

Yohei Mamiya

CONTENTS

■ Commentary

The Current Trends Surrounding Fusion Power..... (3)

Y. Mamiya

■ Introduction

Development of High Sensitivity Rapid Analysis of ³⁶Cl by ICP-MS/MS (9)

N. Sekine / H. Mikami / K. Hirata

Adaption of Simulation and AI Technology for Exploration of Geothermal Resources ... (13)

T. Kodaka / S. Kuribayashi / T. Shimizu

Cover Design : Ryohei Kouno

〔概 要〕

核融合発電は発電過程で温室効果ガスを排出しないクリーンエネルギーかつエネルギー安全保障の確保に大きく貢献する未来の発電方法の一つとして期待され、欧米の核融合スタートアップを中心に多額の資金調達を実現していることから注目を集めている。欧米各国も核融合発電の実用化に向けた政策支援を強化している一方、主要な核融合スタートアップは支援も活用しながら政府目標以上の早期の実用化に向けた研究開発に取り組んでいる。核融合発電にも様々な方式・燃料など複数の技術があり、どの技術・企業が先行をするのか見通すことは難しいが、この機運の高まりを粘り強く醸成していくことが必要だ。

1. はじめに

2022年2月、ロシアによるウクライナ侵攻以降、世界中で燃料価格の急騰など各国のエネルギー安全保障が脅かされることとなった。特にロシアにLNGを依存していた欧州やエネルギー自給率の低い日本は、燃料価格の上昇に伴って電気料金が高騰するなど、社会経済に大きな影響を与えることになった。こうした事態を受けて、再エネ導入などによってカーボンニュートラルの取り組みを加速していた各国はエネルギー安全保障の観点から化石燃料の安定的な調達の重要性を再認識した。しかしながら、世界的にカーボンニュートラル潮流に変化はなく、自国のエネルギー自給率向上に寄与する再エネ導入拡大や原子力発電の取り扱いの見直しなど、非化石電源導入に向けた官民の動きが加速している。そのような状況の中で、温室効果ガスを排出せず、エネルギー自給率向上に寄与するとされる核融合発電という革新的技術への注目が高まっている。日本でも岸田政権が2023年2月に閣議決定したGX基本方針において、核融合発電は革新的原子炉の一つとして位置付けられている。そして、実際に核融合発電の技術開発に取り組むスタートアップによる大規模資金調達や技術進展の報道を目にする機会も増えているところだ。本稿では未来の発電方法の一つとして注目を集める核融合発電を取り巻く足下の状況について論じていきたい。

2. 核融合が革新的なエネルギー源として注目される背景

まず、核融合発電が注目される要因としては、それ自体が有する特徴が、国際社会が抱える課題解決に寄与するからである。それは発電の過程で温室効果ガスを排出しないカーボンニュートラルに資するクリーンなエネルギー源であること、そして実現可能性が高いとされるD-T反応で使用される燃料が海水中に豊富にあることだ。核融合はクリーンなエネルギー源であることに加え、地上の太陽とも言われる通り、燃料1gで石油8t分という非常に莫大なエネルギーを発生させることができる。そして特に海水が燃料源となることは化石燃料資源に乏しいが、四方を海に囲まれた島国である日本にとってエネルギーの安定供給の課題を根本的に解決する可能性があると言って良いだろう。燃料の供給源となる海水は地球表面の3分の2を覆っており、燃料の抽出技術が確立されれば、化石燃料にあるような資源の偏在性を解消可能なものとなる。つまり核融合発電技術が確立されれば化石燃料からクリーンエネルギーに移行しつつ、特に自給率を高めるという観点でエネルギー安全保障の確立に大きく貢献しうる。例えば温室効果ガスを発電の過程で排出しない原子力発電の重要性が複数の国々において再認識されているところであるが、燃料として必要な濃縮ウランの製造容量の46%をロシアが占め、EUは

* (株)みずほ銀行 産業調査部 資源・エネルギーチーム

30%超、米国においても28%はロシアから調達している状況である。また、核融合発電は原子力発電のみならず、火力発電の代替となることも想定され、化石燃料の一部をロシアに依存していた欧州や日本にとって、核融合発電にかかる期待は大きい。このように、海水があれば燃料枯渇の可能性がない核融合発電が実現することにより、各国のエネルギー安全保障の強化に大きく寄与しうるのである。

なお、「核」と名がつくとウランのような核物質を燃料とする原子力発電と同種のものとして誤解されやすいが、プロセスが異なる。原子力発電はウラン235のような重い原子核が中性子とぶつかって中性子と核分裂生成物に分裂する時に莫大なエネルギーが放出され、連鎖的に反応が続く一方、核融合は重水素と三重水素のような軽い原子核がぶつかり原子核が融合して、ヘリウムと中性子に変化する時の質量変化によって莫大なエネルギーを放出する。そのため、原子力発電は核分裂反応を抑制させることが必要となるが、核融合発電では、プラズマ維持のための加熱や燃料供給が止まれば核融合反応は起らず、反応を抑制する必要がないため、電源を喪失したとしても安全に停止させることが可能とされる。そして原子力発電と核融合発電はともに放射性廃棄物が発生することにはなるが、原子力発電では厳重な管理が必要となる高レベル放射性廃棄物が発生する一方、核融合発電では従来技術で処分可能な低レベル放射性廃棄物の発生に留まる。このように気候変動対策および資源制約を解消するほか、原子力発電と比較しても安全性などの優位性があることが、核融合発電が注目を集める主な要因だと言えるのではないだろうか。

3. 核融合発電の主要方式の概要

ここで、核融合発電で研究開発が進められている主要な方式について整理する。核融合で発電に必要なエネルギーを生み出すためには燃料となる重水素と三重水素を高温高压のプラズマ状態にさせる必要がある。それを実現するための主要な方法として「磁場閉じ込め」と「慣性閉じ込め」の2種類を挙げることができる。強力な磁場を利用・制御することで、真空状態にある核融合炉内で超高温プラズマを閉じ込める方法が「磁場閉じ込め」であり、

その代表格が、ねじれた磁場によってプラズマをドーナツ状にして閉じ込める「トカマク式」と呼ばれるものである。そしてトカマク式と同じようにドーナツ状のねじれた磁場でプラズマを閉じ込めるが、磁場を作るためにヘリカルコイルと呼ばれるねじれたコイルを使用する「ヘリカル式」がある。ヘリカル式は構造が複雑になるが、ねじれた磁場を維持しやすいとされる。また、トカマク式やヘリカル式のようにねじれた磁場ではなく、ポロイダル方向に回転した磁場でプラズマを閉じ込める「逆転磁場配位型(FRC)」やプラズマを流れる電流が作る磁場でプラズマ自体を圧縮し、高温高密度状態を作り出す「Zピンチ」などが磁場閉じ込め方式の主要方式と考えられる。

上記のような磁場ではなく、レーザーを使用した「慣性閉じ込め」は重水素と三重水素で製造された燃料ペレットの表面をレーザーによって加熱・プラズマ化させ、それにより発生する圧力で燃料ペレット内部を高圧状態(爆縮)にさせることで高温プラズマを生成する方法で、「レーザー式」と呼ばれる。そして、「磁場閉じ込め」と「慣性閉じ込め」を組み合わせた「複合式」というものがあり、ドーナツ状の磁化プラズマを炉中心部に注入し、それを外から圧縮させることで高温高压状態のプラズマを生み出すことが可能となる。

以上のように核融合発電といっても様々な方式があり、特徴も異なる。なお、文部科学省による審議会の議論の中では、トカマク式、ヘリカル式、レーザー式を代表的な閉じ込め方式とされ、その他の方式は革新的閉じ込め方式と整理されている。

4. 核融合発電を巡る主要国の政策・スタートアップ動向

核融合発電を巡る研究は従来からなされており、特に国際的なプロジェクトであるITERを中心に各国が取り組んできた。ITERは1985年の米ソ首脳会談を契機としたもので、日本、米国、欧州、中国、ロシア、インド、韓国の7極が参加し、フランスにおいて実験炉建設が現在においても進行している。その目的は核融合による出力と外部入力10以上の燃焼プラズマを300～500秒生成、各種核融合工学技術を統合して有効性を実証していくことや

表1 核融合スタートアップの資金調達額上位10社¹⁾

企業名	所在国	設立年	調達金額	核融合発電方式
Commonwealth Fusion Systems	アメリカ	2018	20億ドル以上	トカマク式
TAE Technologies	アメリカ	1998	12億ドル以上	FRC
SHINE Technologies	アメリカ	2005	7億ドル	磁場・静電気閉じ込め
Helion Energy	アメリカ	2013	5.8億ドル	FRC
ENN	中国	2006	4億ドル	トカマク式
General Fusion	カナダ	2002	3億ドル以上	複合式
Tokamak Energy	イギリス	2009	2.5億ドル	トカマク式
Zap Energy	アメリカ	2017	2億ドル	Zピンチ
General Atomics	アメリカ	1955 ^(注)	1.1億ドル	トカマク式
Energy Singularity	中国	2021	1.1億ドル	トカマク式

(注) 核融合商用化に向けた取り組みを開始したのは2022年

(出所) Fusion Industry Association, The global fusion industry in 2023より、みずほ銀行産業調査部作成

ランケットなどの機器試験の実施などとされている。日系の重工・素材メーカーなども技術力を活かし、製品製造・供給を通じて貢献しているところである。しかしながら、当初の計画では2025年に運転開始、2035年に核融合運転(本格運転開始)とされていたが、そのスケジュールにも遅延が生じているとの報道もされている。

かかる中、各国はITERの進捗も見極めながら、独自に核融合発電の実用化に向けた戦略・ロードマップを策定して国費を投じるなど、国際協調から国際競争へと移行を進めている。米国エネルギー省は2022年3月17日に核融合サミットを共同で開催し、核融合の商用化に向けた大胆な10年ビジョンの策定を加速することとされている。そして核融合パイロットプラントの設計を支援する基礎研究に対して総額5,000万ドルの支援などを実施している。実際に米国の国主導のプログラムは大きな成果を上げており、2022年12月にローレンス・リバモア国立研究所で、レーザー方式において投入量以上のエネルギーの生成に成功したと発表した。当施設のレーザーは8時間に1回しか打つことができないなど、核融合発電実用化に向けた課題はあるものの、非常に大きな成果とされ、2023年7月には2回目の実験に成功している。米国は核融合を将来のクリーンなエネルギー源としてだけでなく、自国の科学技術のリーダーシップを確保し、経済と国家安全保障に利益をもたらすものとして位置付け、強力な支援策

を講じているところだ。英国政府は米国よりも早く戦略策定をしており、2021年10月に「Towards Fusion Energy – The UK Government’s fusion strategy –」を公表した。2040年までに英国に原型炉を建設することを目指し、英国原子力公社と協力して、国際・科学技術・商業面の3本柱において、英国がリーダーシップを発揮することを目指している²⁾。従来から核融合に対する資金支援は行われていたが、新たな投資パッケージとして追加的な支援もなされている。2023年10月には「Towards Fusion Energy 2023 – The next stage of the UK’s fusion energy strategy –」が公表され、核融合戦略のアップデートがなされている³⁾。

このような各国政府による取り組みだけでなく、民間による投資も急増し、主要な核融合スタートアップは政府目標よりも早い時間軸での商用化を目指して研究開発に取り組んでいる。Fusion Industry Associationのレポートによると、核融合スタートアップへの累計投資額は2021年では20億ドルであったものが、2022年には約49億ドルと倍増以上、2023年には62億ドルで大きく増加している。主要なスタートアップは欧米に集中しており、表1の通り、資金調達額上位5社クラスでは、4億ドル以上の規模となる。

核融合への投資が注目を集める背景として、資金調達額の拡大スピードのみならず、著名な投資家の存在がある。例えばMicrosoft創業者のBill Gatesは世界で最も大きな資金調達規模を誇る米国

Commonwealth Fusion Systemsに、Amazon創業者のJeff BezosがカナダのGeneral Fusionに投資している。個人だけでなく、GoogleがTAE Technologyに投資するなど、核融合に対する民間投資が加速している状況だ。投資を受けるスタートアップ側も核融合発電の実用化時期（送電網への接続時期）について、最も多くの企業が2031～2035年と回答するなど野心的な目標を掲げて研究開発に取り組んでいる。ChatGPTで一躍時の人となったOpen AIのCEOであるSamuel Altmanが出資するHelion Energyは2023年5月に、2028年までにMicrosoftに対して核融合発電による電力供給を行うPPA契約を結んだと発表した。核融合発電によるPPA契約は世界初の取り組みであり、2028年の供給開始は主要スタートアップが商用化時期として掲げているのが2030年代ということも勘案しても野心的な目標である。

5. 日本の核融合発電実用化に向けた官民の動向

こうした世界の動きも受けて、日本政府も2023年4月に「フュージョンエネルギー・イノベーション戦略」を策定し、フュージョンエネルギー（核融合）の産業化をビジョンに掲げ、民間投資の呼び水となるような具体的なアクションを盛り込んだ国家戦略を策定した⁴⁾。科学技術政策を担う文部科学省では国際プロジェクトのITERの進捗に基づく支援を展開している。2022年10月に公表された原型炉建設に向けたアクションプランの検討においては、ITERの核融合反応の実証直後から原型炉建設に着手し、従前よりも5年程度前倒して2045年に原型炉の発電実証を目指すこととされた。そして2023年6月からは「核融合の挑戦的な研究の支援の在り方に関する検討会」を開催し、研究開発の幅を持たせるためにITERから原型炉、実用炉と段階的にフォアキャストで推進するアプローチではなく、従来とは異なる発想で、バックキャストで取り組むべき核融合研究テーマの検討に着手しているところだ。その中で2035年のマイルストーンとして、「フュージョンエネルギーシステムの多様な社会実装に向けた用途の実証（小型動力源などの原理実証）」、2050年の達成目標として「小型動力源などの革新的な社会実装を可能とする革新的なフュージョンエネルギーシ

テムの実現」とされており、欧米の動きも踏まえた目標設定が示されている⁵⁾。

民間側ではITERへの製品製造・供給に対して日本企業の技術力を活かして取り組んできたが、日本の核融合専門のスタートアップが設立されたのは2019年のことであり、各社の動向について整理してみたい。先駆けとなったのは京都大学発ベンチャーの京都フュージョニアリングである。京都フュージョニアリングはプラントエンジニアリングに特化し、ジャイロトロン、ブランケット、ダイバーターの開発・設計や核融合炉設計支援に取り組んでいる。2023年5月にはシリーズCラウンドで総額105億円の資金調達を実施し、累計資金調達額が122億円になるなど大きな注目を集めた。出資者の業種は電力会社などのエネルギー会社だけでなく総合商社や金融機関まで多岐に渡る。そして2023年10月にはカナダのGeneral Fusionと社が計画する商業用パイロットプラントの実現に向けた協力関係を開始する覚書を締結したことを発表した。General Fusionが取り組む磁化標的核融合（Magnetized Target Fusion）の商業用パイロットプラントにおける熱・燃料サイクルシステムの設計・開発を協力して行っていくこととされている。

2021年には負荷追従可能とされるレーザー核融合に取り組むEX-Fusionが設立された。当社はレーザー核融合の商用化を目指す過程で得られる最先端の光制御技術・知見などを活用し、エネルギー分野にとどまらず、様々な産業分野の技術開発に貢献していくことを志向している。商用化目標年を2035年とし、負荷変動に対応すべく持続的にエネルギーを生み出すための連続的な点火のための技術開発などに取り組んでいる。2023年7月にはシートで総額18億円の資金調達を実施し、累計調達額は19.3億円に到達している。EX-Fusionは大学との協業を推進しており、2023年10月には大阪大学レーザー科学研究所とレーザー照射システムの実証に関する研究を行う協働研究拠点を設立、同月には東京工業大学と発電用液体金属デバイスの高度化に関する研究を行う協働研究拠点を設立している。

2021年には磁場閉じ込めのヘリカル式に取り組むHelical Fusionが設立された。2023年4月には金融機関などから計8億円の資金調達を実施してい

る。ヘリカル式はトカマク式同様に磁場でプラズマを閉じ込めるが、その磁場を生み出すためにヘリカルコイルというねじれたコイルを使用する。そのため、構造は複雑だが定常運転がしやすいとされている。そして2022年には、ノーベル物理学賞を受賞した中村修二教授が中心となりレーザー核融合に取り組むBlue Laser Fusionが設立、2023年7月には2,500万ドルの資金調達を実施したことを発表した。同社は原子力発電用タービンを供給する東芝エネルギーシステムズや金属加工技術に強みのある由紀ホールディングスと協業しており、2025年までに最初の原型炉を完成させ、2030年までに商用に適した核融合炉を実証することを目標としている。また、多くのスタートアップが採用するD-T反応とは異なり、中性子を発生させない軽水素とホウ素を燃料として採用していることも特徴的だ。

このように核融合に取り組むスタートアップ側の動きが活発になっているが、その資金の出し手となる投資側の動きにも着目してみたい。特に日本企業の中で積極的な動きを見せているのが住友商事である。同社は2021年4月に設立したエネルギーイノベーション・イニシアチブにおいて「カーボンフリーエネルギーの開発・展開」を戦略の一つとして掲げており、その一環として先行する欧米の核融合スタートアップへの関与・連携強化をすすめている。2022年6月には米国の核融合スタートアップでFRCという従来式とは異なる核融合方式に取り組むTAE Technologyに出資、2023年7月にはトカマク式を採用する英国のTokamak Energyとフュージョンエネルギーの社会実装に向けた協業を発表している。この連携強化の狙いとしては、核融合発電の最先端の技術・業界動向への理解深耕、核融合サプライチェーンへの関与、発電以外の他産業への活用可能性の検討を進めるためとされている。

6. 核融合発電の技術動向

IAEAの公表データによると、国際的な共同プロジェクトのITERに代表されるような政府主導のプロジェクトはトカマク式、レーザー式、ヘリカル式のような従来方式のものが多く、約8割を占めている。一方、民間プログラムに目を向けてみると、従来方式は半分程度を占めるに過ぎず、もう半分はそれ以

外の方式を採用している。従来型の方式の取り組み核融合スタートアップは、高温超電導磁石などの革新的な要素技術を用いた小型化などによる課題解決に取り組んでいる。世界最大の資金調達規模を誇る米国のCommonwealth Fusion Systemsは世界最高レベルの20テスラの磁石の開発に成功し、ITERの40分の1サイズのトカマク装置を製造可能だとしている。同社はSPARCと呼ばれる実証炉を2021年よりMA州において建設中で、2025年に稼働予定としている。一方、革新閉じ込めを採用するスタートアップは、革新閉じ込めの設計そのものによる小型化や、中性子を出さない燃料を使用することなどによって、従来型が抱える課題の解決に取り組んでいる。例えば、住友商事が出資する米国のTAE Technologiesはトカマク式に比べ、弱い磁場で高圧力のプラズマを閉じ込め可能とされるFRCを採用し、装置の小型化を進めている。同社は燃料として中性子の発生しない軽水素とホウ素11による反応による核融合を目指す、10億℃以上の高温プラズマが必要となることが課題であった。2023年2月には日本の核融合科学研究所との共同研究で高エネルギーのビームを使用することで、上記温度にならずとも核融合反応が可能なることの実証に成功したことを発表するなど確かな前進をしているのも事実だ。

同じ核融合といっても採用する方式、燃料などに大きな違いがある中で、どの技術あるいはどの企業が先行するのか予見するのは困難である。その中で各核融合方式の性能を評価するうえでは、「イオン密度×イオン温度×閉じ込め時間」の三重積が重要な指標となっており、現状では、図1のとおり、トカ

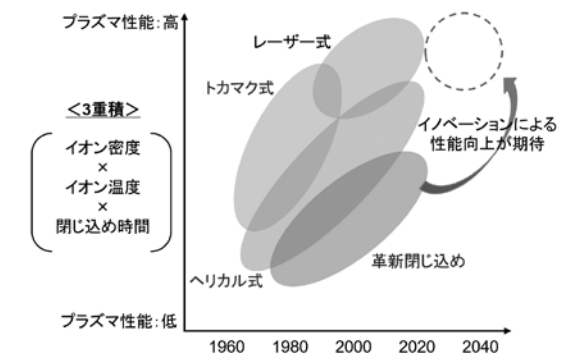


図1 各核融合方式の性能推移のイメージ（ローソン図）
（出所）みずほ銀行産業調査部作成

マク式、ヘリカル式、レーザー式の従来式が先行する状況である。

大規模な資金調達に成功している従来式を採用するスタートアップだけでなく、足下では三重積は劣後する革新閉じ込め方式を採用する核融合スタートアップにおいても、従来式に対する優位性などを示すことで、資金調達に成功している企業は多い。このように従来式や革新閉じ込め問わず、核融合スタートアップ企業は、イノベーションによる非連続的な飛躍的向上を目指して研究開発に取り組んでおり、その技術動向には目が離せない。

7. おわりに

これまで核融合発電に着目して足下の動向を解説してきたとおり、現状では核融合技術の主要市場は発電向けが大宗を占めている。しかし、業界団体のFusion Industry Associationのレポートでは産業用の熱需要やオフグリッドエネルギー、クリーン燃料製造が次ぐマーケットとして期待がされており、さらに潜在的な市場としては、宇宙・海洋推進力、医療等の発電等のエネルギーに限らない分野への転用可能性を持つとされており、裾野の広い分野でもあることも核融合が持つ可能性である。

足下ではベンチャーキャピタルや事業会社による核融合スタートアップへの投資が進んでいる。どの技術が覇権を握るか見通せないため、Bill Gatesが設立した脱炭素に関する投資などを行うBreakthrough Energy Venturesのようにトカマク式、レーザー式、

ヘリカル式、革新閉じ込めの各スタートアップに対して全方位で投資を行う事業者も現れている。すべての企業がこのような全方位投資を行っていくことは難しいかもしれないが、まずは未来の発電方法の一つとしてポテンシャルがある革新的な技術として核融合に関心を持ち続けることが必要だろう。カーボンニュートラルとエネルギー安全保障の確立が求められ、核融合発電に対する各国政府および投資家の期待が高まっている現代でこそ、その灯を消すことなく、粘り強く地上の太陽の実用化にまで至ることを期待したい。

参考文献

- 1) Fusion Industry Association, The global fusion industry in 2023 (2023)
- 2) UK Government, Department for Business, Energy & Industrial Strategy, Towards Fusion Energy The UK Government's fusion strategy (2021)
- 3) UK Government, Department for Energy Security & Net Zero, Towards Fusion Energy 2023 The next stage of the UK's fusion energy strategy (2023)
- 4) 内閣府, フュージョンエネルギー・イノベーション戦略 (2023)
- 5) 文部科学省, 核融合の挑戦的な研究の支援の在り方に関する検討会 最終とりまとめ案 (2023)

ICP-MS/MSを用いた³⁶Clの迅速分析手法の開発 Development of High Sensitivity Rapid Analysis of ³⁶Cl by ICP-MS/MS

関根 伸行* 見上 寿* 平田 一 亮*
Nobuyuki Sekine Hisashi Mikami Kazutaka Hirata

〔概要〕

半減期が長いベータ線放出核種である³⁶Clは、一般的な放射化学分析では複雑な分離作業と高度な化学操作が必要となる。³⁶Clを含む放射性廃棄物を安全かつ円滑に埋設処分するためには、迅速な分析手法が必要となる。そこで、反応セルを備えた誘導結合プラズマ質量分析装置(ICP-MS/MS)を用いた³⁶Clの迅速分析手法を検討し、さらに放射性解体金属である伝熱管の³⁶Cl分析への適用性を検討した。その結果、計測時間を従来の1/30に短縮でき、かつ伝熱管に適用できることを確認した。本稿では、ICP-MS/MSを用いた³⁶Clの迅速分析手法について紹介する。

1. はじめに

原子力施設などで発生する放射能レベルの低い廃棄物は、セメントなどで固めてドラム缶に密閉した廃棄体として埋設処分される。廃棄体に含まれる放射性物質は種類と許容量が規定されているため、処分する前にこれを分析する必要がある。しかし、一部の放射性物質では、放射線測定に必要な前処理が煩雑で長時間を要することが円滑な処分の障害となっている。近年、誘導結合プラズマ質量分析(ICP-MS)が注目されており、福島第一原子力発電所では、⁹⁰Srを対象にした分析手法が適用されている。

日本原子力発電株式会社 東海発電所では、伝熱管などの解体廃棄物のL3埋設処分が計画されている。伝熱管の表面酸化物中に³⁶Clが存在する。半減期が長いベータ線放出核種である³⁶Clは、一般的な放射化学分析では複雑な前処理と高度な化学操作が必要となり、分析期間も約5日間と長い。そこで、³⁶Cl分析手法の迅速化を目的として、反応セルを備えた誘導結合プラズマタンデム型質量分析装置(ICP-MS/MS)の適用性を検討した。

本稿では、³⁶Clの迅速分析手法の開発と放射性解体金属への適用性について述べる。

2. 分析システム

2.1. IC-ICP-MS/MS

イオンクロマトグラフィー(IC)とICP-MS/MSを連結したIC-ICP-MS/MSを用いた。これにより、分析試料中に共存する成分を化学的性質の違いにより分離してICP-MS/MSに導入することができるため、ICP-MS/MSでの干渉を低減することが可能となる。

2.2. 分析機器

ICP-MS/MSはパーキンエルマー製 NexION5000を用いた。本装置は、反応セルの前後に四重極を備えており、従来のシングル四重極型に比べ干渉除去に優れており、従来では困難であった微量分析が可能である。

ICはサーモフィッシャー製 Dionex Integriion HPICシステムを用いた。ICは、共存する成分を化学的性質の差異によって分離する機能を有する。

3. 干渉イオンの除去

ICP-MS/MSでは、分析試料溶液中に多量の共存成分が存在すると、スペクトル干渉の影響を受けられることがある。干渉除去の一つであるマスシフト法について説明する。図1に示すように、プラズマによってイオン化した分析対象イオンと干渉イオンは、分析対象イオンの質量数(m/z)に設定された四重

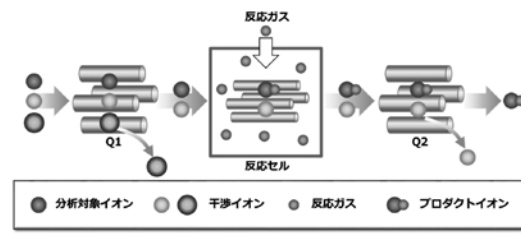


図1 ICP-MS/MSのマシフト法

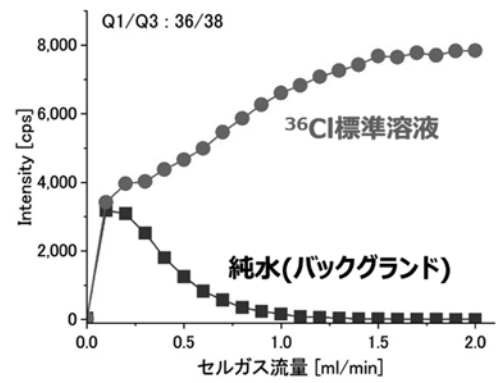


図2 水素リアクションのセルガス依存性

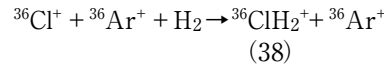
極(Q1)に導入される。Q1に設定された質量数と同じ分析対象イオンと干渉イオンのみがQ1を通過し、反応セル内に導入される。反応セル内で分析対象イオンはセルガスと反応し、質量数が変化したプロダクトイオンが生成する。Q3をプロダクトイオンの質量数に設定することにより干渉イオンを除き、分析対象イオンをプロダクトイオンとして検出する。

³⁶Clを対象にした場合、干渉イオンは³⁶Cl⁺の同重体である³⁶Ar⁺、³⁶S⁺であり、これらの影響を低減することが必要となる。

3.1. ³⁶Arの干渉低減

³⁶Ar⁺による干渉は、ICP-MS/MSのキャリアガスのアルゴンに起因する。この干渉を低減するために、セルガスに水素を用いた水素リアクションによるマシフト法を検討した。図2に、³⁶Cl標準溶液(12.4Bq/ml)、純水(バックグラウンド)のセルガス流量依存性を示す。縦軸は質量数38の感度を表す。水素ガス流量の増加により、感度は³⁶Cl標準溶液を用いた場合で増加、純水を用いた場合で低下する傾向を示した。特に水素セルガス流量1.6ml/min以上でバックグラウンドの感度は一桁程度に低減した。こ

れらのことから、下記反応式に示すように、水素リアクションでは水素は選択的に³⁶Cl⁺と反応し水素が2つ付加したプロダクトイオンの³⁶ClH₂⁺(質量数38)を生成し、³⁶Ar⁺の干渉を低減できることを確認した。なお、水素セルガス流量は1.7ml/minに決定した。



3.2. ³⁶Sの干渉低減

³⁶S⁺による干渉は、金属の溶液化に使用する硫酸の硫酸イオン(SO₄²⁻)に起因する。硫酸イオンは分析対象イオンの塩化物イオン(Cl⁻)と化学的性質が異なるため、ICP-MS/MSの前段のICでの分離を検討した。

分析試料は、³⁶Cl(1.2Bq/ml)と硫酸イオンの混合溶液とした。硫酸イオン濃度は1, 10, 100ppmの3条件とし、³⁶Cl検出感度に対する硫酸イオン濃度の影響を評価した。表1と図3に結果を示す。ICでの硫酸イオンの検出時間は13~15分であり、塩化物イオンの検出時間(6min)と大きく異なり、ICP-MS/MSの³⁶Cl検出感度は硫酸イオン濃度に大きな影響がなかった。このことから、³⁶S⁺の干渉はICによって除去できることを確認した。

3.3. IC-ICP-MS/MSの検出下限値

IC-ICP-MS/MSの検出下限値を確認するため、³⁶Cl標準溶液により検量線を確認した。図4に検量線を示す。これらの結果から検出下限値は0.1Bq/ml程度になることを確認した。

3.4. 内部標準法の適用

実廃棄物中の³⁶Clを正確に測定するためには、化学的操作による分析試料のロスなどを考慮する必要がある。そこで、安定同位体元素である³⁵Clによる内部標準法を検討した。³⁵ClはICによる評価のため³⁶Clに比べて高濃度に設定する必要があるが、ICP-MS/MSでの干渉が懸念される。そこで、内部標準として適用可能な上限濃度の確認を行った。分析試料は、³⁶Cl(1.2Bq/ml)と³⁵Clの混合溶液とした。³⁵Clは1, 10, 100ppmの3条件とし、³⁶Cl検出感度に対する³⁵Clの影響を評価した。表2と図5に結果を示す。塩化物イオン1ppm以上でICでの検出が

表1 硫酸イオンの影響度評価の測定結果

分析試料		IC-ICP-MS/MS		
SO ₄ ²⁻ [ppm]	³⁶ ClLSc [Bq/ml]	面積値 [cps]	³⁶ ClICP [Bq/ml]	³⁶ ClICP / ³⁶ ClLSc
1	1.2	265	1.04	0.87
10		264	1.03	0.86
100		258	1.01	0.84

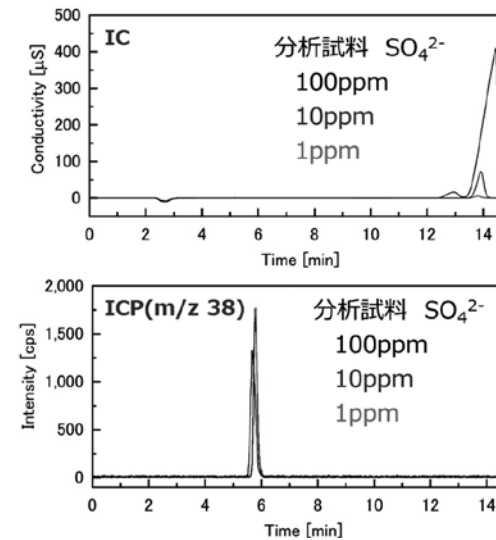


図3 硫酸イオンの影響度評価 (上段: IC, 下段: ICP-MS/MS)

可能である。一方、ICP-MS/MSの³⁶Cl検出感度は³⁵Cl 100ppmで増大したが、10ppmでは大きな影響がないことを確認した。このことから、内部標準としての³⁵Cl濃度を10ppmとした。

4. 解体廃棄物への適用検討

日本原子力発電株式会社殿のご協力の下、東海発電所に保管されている実機の放射性解体金属であるSRUの伝熱管の³⁶Cl分析への適用性を検討した。³⁶Clは伝熱管の表面酸化膜中に存在するため、硫酸によるエッチング処理で溶液化し³⁶Clを抽出した。次に、伝熱管エッチング液をTrisKem製CLレジンをを用いた固相抽出により、鉄などの夾雑物の除去を行い、同時に分析試料の濃縮(10倍濃縮)を行った。表3と図6にIC-ICP-MS/MSの分析結果を示す。なお、比較として、液体シンチレーションカウンタ(LSC)による放射能測定結果を併せて示した。IC-ICP-MS/MSの測定結果はLSCの濃度と約

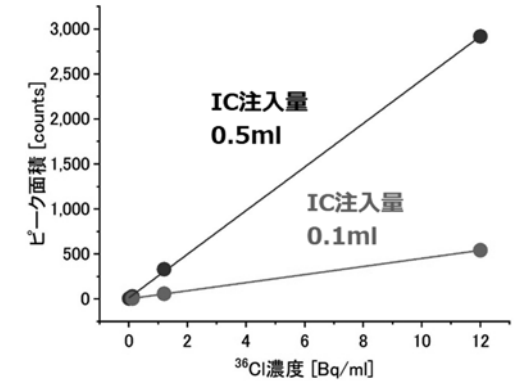


図4 IC-ICP-MS/MSの検量線

表2 塩化物イオンの影響度評価の測定結果

分析試料		IC-ICP-MS/MS		
³⁵ Cl ⁻ [ppm]	³⁶ ClLSc [Bq/ml]	面積値 [cps]	³⁶ ClICP [Bq/ml]	³⁶ ClICP / ³⁶ ClLSc
1	1.2	260	1.04	0.86
10		266	1.06	0.88
100		350	1.41	1.17

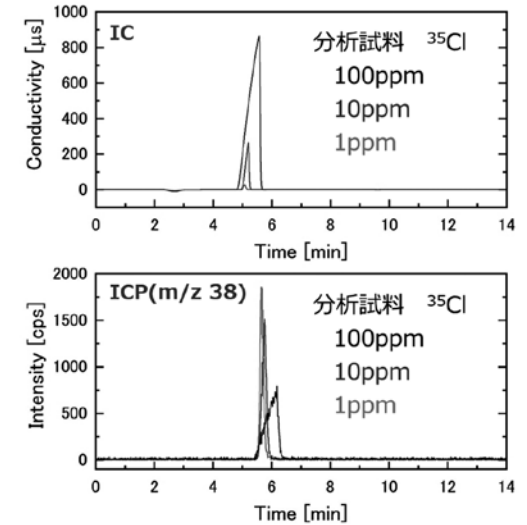


図5 塩化物イオンの影響度評価 (上段: IC, 下段: ICP-MS/MS)

10%程度の差異を確認した。今後、内部標準法の適用により改善されると考えられる。これらの結果から、IC-ICP-MS/MSが伝熱管の³⁶Cl分析に適用できることを確認した。また、固相抽出を含む分析時間は約3.5時間であり、従来の放射化学分析に比

表3 伝熱管エッチング液の測定結果

	固相抽出液	IC-ICP-MS/MS		
	$^{36}\text{Cl}_{\text{LSC}}$ [Bq/ml]	面積値 [cps]	$^{36}\text{Cl}_{\text{ICP}}$ [Bq/ml]	$\frac{^{36}\text{Cl}_{\text{ICP}}}{^{36}\text{Cl}_{\text{LSC}}}$
伝熱管エッチング液	0.92 ± 0.03	47	1.0	1.09

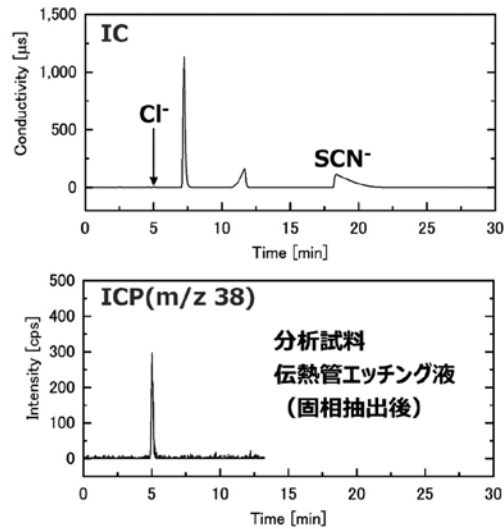


図6 伝熱管エッチング液の測定結果 (上段: IC, 下段: ICP-MS/MS)

べ1/30に迅速化できることを確認した。

5. あとがき

ICとICP-MS/MSを連結したIC-ICP-MS/MSの ^{36}Cl 迅速分析手法について述べた。本分析手法を実際の運用に適用するためには、データの拡充、信頼性および業界認知度の向上などが課題である。また ^{36}Cl 以外の核種への適用拡大に向けて多核種分析手法の開発を進めている。

実廃棄物への適用検討は、日本原子力発電株式会社殿のご協力により実施された。関係各位に謝意を表す。

地熱探査におけるシミュレーション・AI技術の適用 Adaption of Simulation and AI Technology for Exploration of Geothermal Resources

小高敏裕*
Toshihiro Kodaka

栗林壮太郎**
Sotaro Kuribayashi

清水俊宏*
Toshihiro Shimizu

〔概要〕

日本はエネルギー自給率が低く、エネルギーの安全保障・安定共有を鑑みれば複数の発電方式を組み合わせた多様性が求められる。国土の資源を考えれば、地熱発電は有力な候補の一つである。一方で、「坑井を掘っても地熱貯留槽に当たらない」投資リスクや、地域の自治体や温泉事業者、住民の理解が必要といった課題もある。最近の研究で、地下深部には、海洋プレートに引き込まれた大量の海水がマグマと共に上昇し、高温高压の超臨界状態になって蓄積されていることが明らかにされた。海水起源の超臨界水を発電に用いる超臨界地熱発電が、大電気容量の次世代地熱方式として注目される。筆者らのグループは、ICT企業として培った大規模並列演算を用いたコンピューティングに関する知見と、AIに関する技術・経験を活かして、地下深部の構造をより高精度に推定することで、地熱発電の発展・普及を促進し得る技術開発を目指す。

1. はじめに

日本のエネルギー自給率は、2020年度時点で11.3%と極めて低く、OECD38か国中37位である¹⁾。東日本大震災後に原子力発電所が停止したことが主因であるものの、震災から10年を経過しても2010年時点の20.2%まで回復していない。この数字はエネルギー安全保障上、地政学その他のリスクに極めて脆弱な状態と言える。

経済産業省エネルギー庁(2022)は、自給率が低い原因は国内のエネルギー資源が乏しいことにあると説明している。国内のエネルギー自給率が高まらなかった理由として、そもそも採掘できる資源量が少ないこともあるが、投資が高まらない理由として、筆者は大きく二つあると考える。第一に、日本は1980年台以降長い間円高が続き、仮に資源があったとしても収益性が高まらない。国内でエネルギー資源を開発することはコストが高く、海外から輸入することに経済的合理性があった。円高の勢いが落ちた2010年代以降も、資源開発に対する投資は高まらずにいる。第二の理由は、国内における資源開発のリスクの高さにある。開発を行うためには、

国、自治体、地権者など様々なステークホルダーの承諾を取り、環境問題への配慮などを徹底する必要がある。計画的に準備を進めても、計画が頓挫するリスクがある。

資源の乏しさ、投資効率性、プロジェクトリスクという三重苦の状況においても、エネルギーの安全保障、経済効率性の観点からはエネルギー自給率を高め、特定のエネルギーへの依存を減らすエネルギーミックス政策が重要である。2023年現在、足下では円安が進んでおり、海外から輸入する化石燃料への過度な依存からの脱却は、日本経済における喫緊の課題である。

再生可能エネルギーの導入拡大により自給率向上のための施策が進んでいる。JPEA出荷統計によれば、水力を除く再生可能エネルギーの設備容量は、2012年度から2021年度までの9年間で年平均16%の伸び率で成長し、発電容量は2,000万kWから9,000万kWと4倍になった。結果、一次エネルギー供給に占める、水力を含む再生可能エネルギーの割合は14%程度になった。成長ドライバーとなった太陽光発電は時間変動が大きく、今後さらなる開発を促進するためには、アンモニアを始めとした蓄電

* 富士通(株) コンピューティング研究所

** 同社 人工知能研究所コグニティブグラフ CPJ

の技術革新が不可欠となる。広大な土地を必要とすることから、山林を開いたり休耕農地を利用したりすることへの議論も存在する。太陽光に限らず、風力やバイオマスなどの再生可能エネルギー、そして原子力についても一長一短があり、特定のエネルギーに過度に依存することは、本来の目的であるエネルギーの安定供給、安全保障上のリスクである。

富士通株式会社は、「ビジネスを加速し、社会課題に挑むソリューション」としてFujitsu UVANCE事業を展開している。サステナビリティをキーワードに、テクノロジーの開発と、お客様との共創による世界の持続可能性を高める取り組みを行う。富士通の説明によれば、「持続可能なエネルギー消費」をビジネス機会の第1位と捉えている。筆者はエネルギーの持続可能性を課題と捉え、富士通株式会社研究本部が実施する提案型のプログラム「ボトムアップ研究テーマ」において、地熱発電開発のための技術課題とその解決方法について提案を行った。本稿では、この提案をベースに地熱エネルギーに絞り、その可能性、業界の課題、ビジネス機会、富士通の持つ技術について述べる。

2. 地熱発電開発の利点および課題

2021年現在、国内の再生可能エネルギー発電量に占める地熱発電のシェアは約1.6%と少ない¹⁾。日本は火山国であり、地熱発電のポテンシャルは極めて大きい。日本の地熱資源量は2,347万kW(村岡, 2008)であり、米国、インドネシアに続く世界第3位である。米国とインドネシアは広い国土と人口を有するので、単位面積当たりや人口当たりで見れば日本は両国よりもさらに高いポテンシャルを有する。地熱貯留槽が一つのエリアに密集しており、米国などと比較して、狭い土地でも高出力の発電所を建設できる利点があるとの指摘もある。その高いポテンシャルを、日本は活かせていない。Hutter, et. al (2020)によれば、2020年の日本の地熱発電量は年間2,409GWhであり、ポテンシャルのうち電力として活用できているのは1.2%に過ぎない。この数字は、地熱資源ポテンシャル上位国では、米国(約7%)、インドネシア(6.3%)、ケニア(16.2%)、フィリピン(18.8%)と比較しても極めて少なく、賦存する地熱資源を十分に活かし切れていない。なお、ポ

テンシャル上位国で、最も地熱資源を有効に活用できている国は、日本と同じ環太平洋の島国であるニュージーランド(24.2%)である。

世界と比べても地熱資源開発が進まない理由を、FAPIG参加企業を始めとするエネルギー関連企業や新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)、研究機関などにヒアリングを行った。大きく分けると、以下の3つの理由が挙げられることが分かった。

第一に、1章でも述べた投資リスクが高い点。日本国内で地熱事業に関して、エネルギー・金属鉱物資源機構(JOGMEC)が資源量調査事業費の助成金交付事業を行っている。地元の地熱関係者であれば、地表調査事業費の最大75%、坑井掘削事業費の最大75%が助成される。JOGMECはまた、生産井・還元井の掘削、パイプラインの敷設および発電設備の設置に係る費用を金融機関から借り入れる場合に、2015年以降の実績で80%程度の債務保証による支援を行っている。それでもなお、地熱資源は「掘ってみなければわからない」ことが多く、掘削開始時点での成功確率が低く、国内の商社であっても「地熱資源探査リスクを主体的に負うことは難しい」との声があった。NEDOによれば計画から稼働までのリードタイムが9~13年と他の電源と比べ長く、投資回収に時間がかかる問題もある。

第二に、地熱地域の関係者の協力を得ることが難しいという社会受容性である。国内の主な地熱フィールドの多くは国立公園内にあり、国立公園法により厳しく管理されている。起震車を用いた弾性波探査などは行えないことが多い。発電設備は国立公園外に置き、地熱貯留槽まで斜めに掘っていくことが求められる。また、調査・探査の段階から、地元の自治体や住民理解を十分に得る必要がある。探査エリアが国立公園外であっても、探査や土地への立ち入りのためには、地権者の許諾が必要となるが、そもそも地権が複雑で地権者に会うこともままならないケースがある。近隣に温泉がある場合には、温泉に影響が及ばないことを示さなければ温泉事業者に反対される可能性がある。誘発地震を含め環境への影響についても説明が必要である。

第三に技術課題がある。NEDO⁴⁾によれば、地熱資源開発の最大のリスクは、初期である調査・探査フェーズにある。地熱貯留槽の調査・精査のため

表1 EGSの種類と特徴
出典：NEDO⁴⁾を参考に筆者作成

分類	種別名	特徴
Type1	涵養型	既存の貯留槽に水を注入
Type2	能力増新型	坑井刺激により既存貯留層の拡張、透水性の改善を行う
Type3	脆性域高温岩体発電	浅部岩盤の岩体内に水圧破碎により貯留槽を造成する
Type4	延性域高温岩体発電	延性岩体領域(深部)に貯留槽を形成する
Type5	超臨界地熱発電	プレート起源の古海水による超臨界流体の活用
Type6	マグマ発電	マグマの熱を熱交換等で直接利用

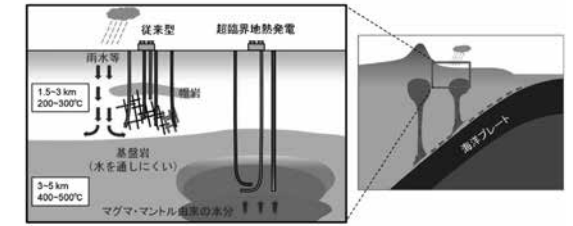
には重力探査、弾性波探査、電磁探査などが使われる。在来型の地熱資源を掘り当てるためには、熱源だけでなく、水脈のある亀裂に坑井をぶつける必要がある。この亀裂が数センチ~数メートルと狭い領域にあるため、正確に発見するためには探査精度が不足する。地下探査に最も使われているマグネトテリック法(MT法;電磁探査の一つで自然磁場を用いる)は、比抵抗(電気の通りにくさ)と呼ばれる物理量を測定することができるが、地下深い場所では十分な解像度が得られず、また鉄道や発電所設備からのノイズに弱いという欠点がある。

日本固有の全般的な問題として地形の複雑さがあり、山が深すぎて弾性波探査を行うための起震車が入り込めない、山奥に発電所を建設しても送電線の架設などにコストがかかるなどの問題もある。

3. 超臨界地熱発電のポテンシャル

発電量の増大・維持を目的に、人工的に貯留層を造成・刺激する技術や未利用の深部高温地熱を利用する革新的技術をまとめて、EGS(Engineered Geothermal System / Enhanced Geothermal System)という。NEDO⁴⁾は、その手法に応じて6種類に分類している。各手法の概要について表1にまとめた。本稿では、EGS Type5として分類される超臨界地熱発電について詳述する。

超臨界地熱発電は、海洋プレートと共に地中に引き込まれた海水を起源とする流体を用いた発電方法である¹³⁾、(図1)。海水はプレートに沿って地下数十キロメートルまで下降した後に、メルト(溶岩にお



出典：NEDO (2021) による図表を一部修正
図1 在来型地熱発電と超臨界地熱発電の違い

ける液状部分)と共に上昇し、地下3,000~5,000mに地熱貯留槽として蓄えられる。地下の高温高压状態(374℃以上かつ22.1MPa以上)では、水は超臨界状態となっている。超臨界水を使う発電方式であるため、超臨界地熱発電と呼ばれる。より浅い領域に蓄積される天水を用いる在来型の地熱発電とはこの点で異なる。日本における超臨界地熱発電研究は、東北大学および産業技術総合研究所(産総研)のグループが中心となって2012年に開始したJBPP(Japan Beyond Brittle Project)が発端となっている⁵⁾。在来型地熱発電が岩石の脆性域(Brittle)の貯留槽を使うのに対し、本プロジェクトでは脆性域より深い延性域を使うために、Beyond-Brittleと命名された。

超臨界地熱発電には、在来型にはないいくつかのメリットがある。最大のメリットは、そのエネルギー量にある。プレート起源の海水を使うために天水よりも潤沢に存在し、温度も高温なことから単位質量当たりのエンタルピー(熱含量)も大きい。安川(2018)は、「近年になって東北地方の深さ4~5kmの古カルデラには、500℃程度の超臨界状態の水が存在し、一か所で1GW規模(原発1基分)の地熱発電ができる可能性が示唆された」と述べている。Okamoto, et al. (2017)は国内外の超臨界地熱資源における潜在発電容量をまとめており、葛根田地域における発電容量を、30年に渡り110MWが得られると見積もった。ニュージーランドロトカワ地区や米ザ・ガイザーズでも同等の発電容量が見積もられている。

第二に、超臨界地熱資源は結晶粒界に存在する可能性が高いと指摘されている。在来型地熱では上述の通り亀裂に正確に当てることが求められるこ

と対比すれば、「どこを掘っても当たる」と言われる。結果、大深度まで掘る難しさはあるものの、掘削の成功率は飛躍的に高まる。

第三に、Saishu, et al. (2014) によれば、超臨界地熱貯留槽はシリカ層によって浅部地熱系とは遮断されている。このことは、在来型地熱発電設備のある浅部地熱系や温泉帯水層への影響が少ないことを示す。温泉事業者の理解を得ることが、在来型よりも容易になるという期待がある。

第四に、超臨界地熱貯留槽は脆性延性遷移領域 (BDT ; Brittle Ductile Transition) よりも下部の延性域にあり、応力状態が均質であることから、誘発地震の発生の可能性が低いメリットもある。誘発地震も住民の心配事の一つであり、住民理解が進みやすくなる可能性がある。

NEDOは、超臨界地熱発電技術研究開発⁹⁾の計画において、2023年度までに試掘前調査として資源量評価を行い、2026年度の調査井の掘削を経て、2040年ごろのパイロット実証、2050年の商用運転を目指す。2050年ごろの目標として、11GWの発電容量、78TWhの発電量を目指している。

4. 研究の方向性と価値提案

筆者のグループは、大規模な並列計算を活かしたハイパフォーマンスコンピューティングソフトウェア開発能力と、地熱に関する多様なデータを扱う人工知能技術で、地熱業界に貢献することを目指す。理想的には、在来型地熱発電所の新規開発や維持のためにも役に立ち、その先の超臨界地熱においても貢献できることが望ましい。そのような考えに基づき、地熱事業者や物理探査、研究機関との議論を重ね、二つの有望領域を見つけた。ここでは、その課題意識と価値提案について記す。

4.1. 電磁探査における鋼管ノイズの除去

地熱発電では、生産井から吸い上げた蒸気をタービンに送ることで発電が行われる。生産井で得られる熱水および蒸気は通常数本から十数本を束ねてパイプに送られる。長期に渡り使われる中で、各生産井から得られる蒸気量が減衰することがある。主な要因は経時変化により地熱貯留槽そのものが水量を減らしたり、坑井にスケールが付着し配管が細くなってしまうことである。スケールの問題

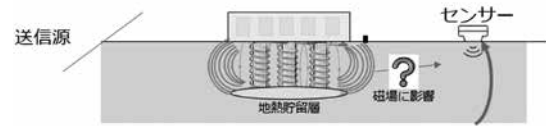


図2 TDEMにおける磁場ノイズ

であれば、それを取り除けば発電量は回復するが、貯留槽そのものの減衰の場合には、新たに追加井を掘るといった選択が採られることがある。発電所建設当初よりも貯留槽の位置や大きさに変化があると認められれば、再度探査からやり直す必要が発生する。

現在物理探査の主流はMT法であるが、より高い分解能を得るために、超電導TDEM (時間領域電磁探査技術) を使うケースが増えてきた。超電導TDEM法は、高い分解能が得られる代わりに送電線や配管に依拠するノイズ源が近くにある場合、正しい計測結果が得られないリスクがある (図2)。特に、導体である配管や坑井の鋼管が地下で入り組む、既存の地熱発電所エリアでは、その大きさが無視できない影響を及ぼす可能性がある。この影響を予測し、実測結果から取り除くことができれば、既存の在来型地熱発電所における追加調査・探査の精度を向上することができる。

4.2. AI を用いた地下温度の推定

地熱発電開発は坑井掘削の際の不確実性が高いことから、リスクを下げるために調査・探査の段階でできる限り正確な地下構造の把握が求められる。地質調査、地下学調査、重力探査、電磁探査などが行われ、調査井掘削を経て総合解析が行われる。この過程では、地熱貯留槽に不可欠な要素である、熱 (温度構造)、水 (透水性)、容器 (帽岩や亀裂などの貯留構造) の推定が行われる。超臨界地熱においては、NEDO¹⁰⁾ がその難しさについて言及しており、温度推定について要約すると以下ようになる。

- ・坑井の検層データは一次元データで、空間的広がりや坑底以深の情報が得られない
 - ・説明変数に使われる比抵抗構造は温度以外にも含水率や間隙水の塩濃度に影響を受ける
- 水と容器については、3章で述べたように、在来型と超臨界型では特徴が異なる。温度については、

上記の特徴の違いはあるものの、浅部の温度推定情報を坑井以深の深さまで外挿することで深部の温度推定が行われている。温度をより高精度に推定することができれば、地熱資源開発の促進に大きく寄与することができる。

5. 技術手法

4章で述べた課題・価値提案に対するアプローチを記す。

5.1. 電磁探査における鋼管ノイズの除去

電磁探査は、送信源 (自然/人工磁場) から発信される磁場がマクスウェル方程式に従うことを利用して、地下の比抵抗などの物理量を推定する技術である。例えばTDEM法では、人工的に発生させた時間変動する磁場を印加すると、ファラデーの法則により地中に誘導電流 (渦電流) が発生する¹¹⁾。この渦電流は、アンペールの法則により新たな磁場 (二次磁場) を発生させる。この二次磁場における時間経過に伴う減衰量を測定することで地下の比抵抗を推定することができる (逆シミュレーション ; インバージョン)。逆に、地下の比抵抗分布が分かっているならば、特定の磁場を印加した際に観測地点での磁場や電場などの物理量をシミュレーションで求めることができる (フォワードシミュレーション)。送信源と測定器の間にノイズ発生源となる鋼管があると、鋼管自体が電磁誘導の影響を受け、測定地点の物理量に何らかの影響を及ぼす。電磁誘導の大きさは、ファラデーの法則より磁場の時間微分に比例することが分かっている。鋼管地点における磁場変動は $\text{empymod}^{12)}$ などのシミュレーションソフト

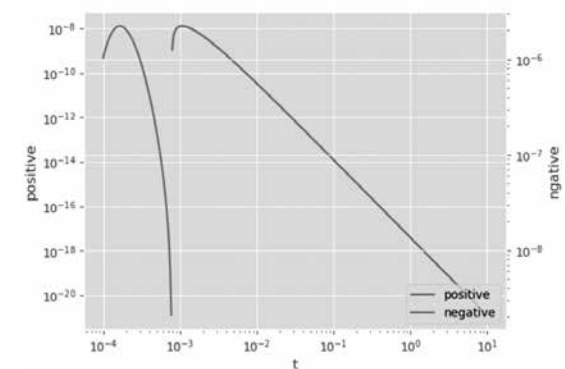


図3 地下鋼管位置に発生する磁場の時間微分成分

ウェアにより計算することができる。例えば一様大地を仮定しステップ波形を入力すると、切断後の磁場の時間微分をシミュレーションで求めた結果は図3のようになる。これに回路の断面積および透磁率を乗じれば誘導起電力を求めることができる。

地下に埋められた鋼管やその他のノイズ源を何らかの等価回路に置き換え、この等価回路の振る舞いを特徴づける物理量を未知パラメータと置くことで、ノイズ源を含めた環境のモデル化を行う。地下鋼管に対する等価回路としては、例えば仮説としてひと巻きのソレノイドコイルが考えられる。鋼管は円形の断面を持つ金属パイプであり、このパイプに磁場の変動が起きる際に、電磁誘導が生ずる。この電磁誘導が再び地中で渦電流を発生させ、受信機に二次磁場を生ずる。この二次磁場の大きさがノイズそのものであるため、シミュレーションを通じて電磁誘導の大きさを特定することでそのノイズも計算で求められると考えた。

5.2. AI を用いた地下温度の推定

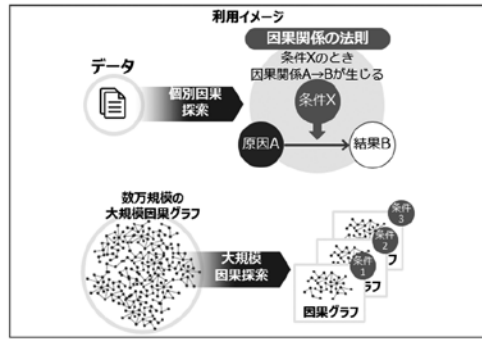
NEDO¹⁰⁾の研究では、収集データとして、検層温度、流体包有物の均質化温度、地質情報、鉱物アイソグラッド (以上坑井データとして分類)、比抵抗3次元構造、震源分布、重力ブーゲー異常 (以上物理探査として分類)、地表標高 (その他として分類) の情報を用いている。他にも、反射法地震探査、同位体分析などの結果を組み合わせることが考えられる。多量の測定結果が地下の温度にどのように影響するかを推論するため、富士通が開発した二つのAI技術の活用を試みる。

(1) 因果発見

技術膨大なデータからあらゆる条件下の因果関係を高速かつ網羅的に計算し、通常は見逃される個別に有用な因果関係を発見する (小柳ら, 2021) (図4¹⁵⁾)。地中の温度構造に影響を与える因子を探し、その因果が発火する条件を見つける。

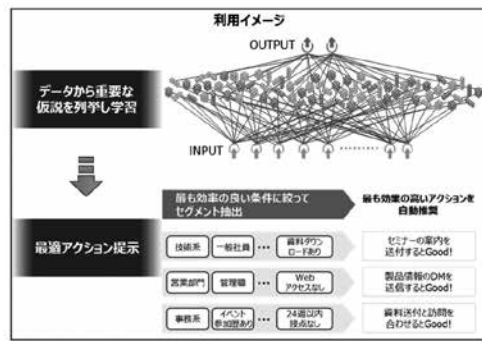
(2) Wide Learning

表形式のデータに対して、あらゆる可能性を網羅的に検証し、判断結果の説明や現場改善アクションを提示する (大堀ら, 2019) (図5¹⁵⁾)。有望な地熱貯留槽が存在する条件を、様々な観測値から発見する。



出典：小柳 (2021) を参考に富士通 SME 推進統括部が修正

図4 因果発見技術



出典：大堀ら (2019) を参考に富士通 SME 推進統括部が修正

図5 Wide Learning技術

6. おわりに

本稿では、日々の社会活動を支えるエネルギー安全保障政策において、多様性が重要であり、日本の地下資源として地熱が有望ではあるものの十分に活用できていないことを示した。筆者のグループでは、富士通の持つコンピューティング能力、AI技術を応用することで、この課題に対して貢献し得る研究領域について議論した。今後は、電磁探査の鋼管ノイズ除去技術においては、シミュレーションにおける机上での実証を行った後に、TDEM法における計測技術で注目される超電導センサテクノロジー株式会社と共同で実測による効果検証を検討する。その後、実際の地熱フィールドにおける観測に活用することを当面の目標とする。AI技術については、産総研地熱チームと連携して地熱データへの適用可能性検討を開始する見込みである。

参考文献

- 1) 経済産業省資源エネルギー庁 (2022). 2022-日本が抱えているエネルギー問題 (前編). https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/energyissue2022_1.html. (2023年11月閲覧)
- 2) 村岡洋文・阪口圭一・駒澤正夫・佐々木進 (2008) 日本の熱水系資源量評価2008. 地熱学会平成20年学術講演会講演要旨集, B01.
- 3) Hutter, G.W., 2020. World Geothermal Power Generation 2015-2020 Update Report, World Geothermal Congress 2020, Virtual Event 27 April 2020, Reykjavik
- 4) 新エネルギー・産業技術総合開発機構 技術戦略研究センター (TSC) (2016). TSC Foresight 地熱発電分野の技術戦略策定に向けて. <https://www.nedo.go.jp/content/100788676.pdf>. (2023年11月閲覧)
- 5) Asanuma, H., Muraoka, H., Tsuchiya, N. and Ito, H., 2012: The concept of the Japan Beyond-Brittle Project (JBBP) to develop EGS reservoir in ductile zones. Geothermal Resources Council Transactions, 36, 359-364
- 6) 安川香澄 (2018) 地熱資源-課題と展望-日本エネルギー学会機関紙えねるみくす, 98, 154-160
- 7) Okamoto, K., Asanuma, H., Ishibashi, T., Yamaya, Y., Siashu, H., Yanagagisawa, N., Mogi, T., Tsuchiya, N., Okamoto, A., Naganawa, S., Ogawa, Y., Ishitsuka, K., Fujimitsu, Y., Kitamura, K., Kajiwara, T., Horimoto, S., Shimada, K., 2019. Geological and engineering features of developing ultra-high-temperature geothermal systems in the world. Geothermics 82, 267-281.
- 8) Saishu H, Okamoto A, Tsuchiya N. The significance of silica precipitation on the formation of the permeable-impermeable boundary within earth's crust. Terra Nova. 2014; 26 (4) :253-9.
- 9) 新エネルギー・産業技術総合開発機構 新エネルギー部. 「超臨界地熱発電技術研究開発」(事後評価) (2018年度~2020年度3年間) プロジェクトの概要 <https://www.nedo.go.jp/content/100938614.pdf>. (2023年11月閲覧)

(2023年11月閲覧)

- 10) 新エネルギー・産業技術総合開発機構 技術戦略研究センター (TSC) (2021). TSC Foresight 地熱発電分野の技術戦略策定に向けて-在来型地熱発電の導入促進と超臨界地熱発電の早期実現に向けて-. <https://www.nedo.go.jp/content/100937780.pdf>. (2023年11月閲覧)
- 11) 光畑裕司, 稲崎富士 (2008). 電気・電磁探査法による浅層地盤の非破壊プロファイリング調査技術. 地質ニュース644号, 14-24頁
- 12) The emsig community. Empymod. <https://empymod.emsig.xyz/en/stable/#>. (2023年12月閲覧)

- 13) 小柳佑介, 上村健人, 浅井達哉, 金児純司, 大堀耕太郎 (2021). 個々の特徴的な因果関係を発見する技術の開発とマーケティングデータへの適用. 経営課題にAIを!ビジネスインフォマティクス研究会 (第18回)
- 14) 大堀耕太郎, 浅井達哉, 岩下洋哲, 後藤啓介, 重住淳一, 高木拓也, 中尾悠里, 穴井宏和: 知識発見によって信頼をつなぐWide Learning 技術. FUJITSU, 70 (4), pp. 48-54, 2019.
- 15) Fujitsu Kozuchi (code name) Fujitsu AI Platform. <https://www.fujitsu.com/jp/about/research/technology/ai/fujitsu-ai-platform/>. (2023年12月閲覧)

FAPIG の 機 構

(2023年12月現在)

理 事 会・委 員 会・事 務 局

会 長 堀 江 理 夫 (富 士 電 機)	理 事 石 原 康 秀 (富 士 通)
副 会 長 西 川 健 史 (双 日)	〃 藤 原 完 (み ず ほ 銀 行)
	〃 山 口 一 彦 (清 水 建 設)
	監 事 水 谷 昭 夫 (み ず ほ 銀 行)
	事 務 局 長 石 黒 修 司 (双 日)

FAPIG委員会

(◎は委員長, ○は副委員長)

企画委員会

◎山田 裕之 (富 士 電 機)
 飯 島 健 晴 (〃)
 高 石 淳 (〃)
 塩 入 正 敏 (〃)
 白 敷 利 和 (富 士 通)
 水 谷 昭 夫 (み ず ほ 銀 行)
 井ノ上弘行 (清 水 建 設)
 朝 倉 大 樹 (〃)
 ○三澤 宜正 (双 日)

広報委員会

◎石黒 修司 (双 日)
 ○櫻井 哲 (富 士 電 機)
 松 田 克 代 (〃)
 伊 藤 貴 代 (〃)
 才 川 美 紀 (〃)
 矢 部 典 雄 (富 士 通)
 木 村 亮 太 (み ず ほ 銀 行)
 小 杉 宗 (清 水 建 設)
 西 尾 弘 毅 (双 日)

禁無断転載

FAPIG No.198
 令和6年2月22日印刷

令和5年度 第1号
 令和6年2月27日発行 (非売品)

発 行 所 第一原子力産業グループ事務局
 〒100-8691 東京都千代田区内幸町2丁目1-1
 双日(株)内
 電 話 (03) 6871-4552
 ホームページ: <http://www.fapig.jp/>
 編集兼発行人 石黒 修 司
 印 刷 所 ミズノプリテック(株)
 〒104-0042 東京都中央区入船2-9-2
 電 話 (03) 5566-6677(代)

Yohei Mamiya

The Current Trends Surrounding Fusion Power

FAPIG No. 198 pp.3 ~ 8 (2024)

Fusion power is expected to make a significant contribution as a future method of power generation. It is considered a clean energy source that does not emit greenhouse gases during the generation process, and it also ensures energy security. The attention it has garnered is evident in the significant funds raised by fusion startups primarily in United States and Europe. In order to achieve fusion power, these countries are strengthening their policy support. Meanwhile, major fusion startups are actively engaged in R&D to achieve practical application ahead of the government's targets schedule, utilizing the available support. It is difficult to predict which technology or company will take the lead. Nevertheless, it is crucial to persistently nurture this growing momentum.

KEYWORDS : fusion power, clean energy source, energy security, fusion startups, R&D

Toshihiro Kodaka, Sotaro Kuribayashi, Toshihiro Shimizu

Adaption of Simulation and AI Technology for Exploration of Geothermal Resources

FAPIG No. 198 pp.13 ~ 19 (2024)

KEYWORDS : Supercritical Geothermal Power Generation, Geophysical Exploration
Electromagnetic Exploration, Magnet-telluric method, TDEM, Noise
cancellation

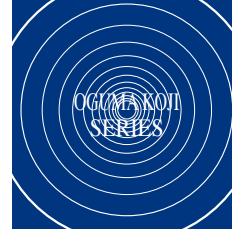
Nobuyuki Sekine, Hisashi Mikami, Kazutaka Hirata

Development of High Sensitivity Rapid Analysis of ^{36}Cl by ICP-MS/MS

FAPIG No. 198 pp.9 ~ 12 (2024)

^{36}Cl is a beta-emitting nuclide with a long half-life, and typical radiochemical analysis requires complex separation procedures and advanced techniques. In order to safely and smoothly disposed of radioactive waste containing ^{36}Cl , a rapid analysis method for ^{36}Cl is required. In this study, a rapid analysis method for ^{36}Cl by ICP-MS/MS for metal waste was investigated and its applicability to actual waste was evaluated.

KEYWORDS : ICP-MS, MS, ^{36}Cl



FAPIGギャラリー

FAPIG広報委員会が推薦するアーティストの作品を展示する広場です。



赤と黒い跡

(ジナーp・90ミリF4.5・エクタクローム100プラスプロ・絞りf45・2分の1秒)



街中の要塞

(ジナーエキスパート・75ミリF4.5・エクタクローム100プラス・絞りf45・1秒)

作者プロフィール

尾熊 絛而 Oguma Koji

1966年 静岡県浜松市生まれ

現在 清水建設株式会社 建築総本部 原子力・火力本部在職中

写真歴

1976年 小6の誕生日、父に半分出してもらい一眼レフを購入。中判、大判カメラを経て、現在はデジタルスチルカメラで主に家人を撮影中

受賞歴

2012年 2012年度アサヒカメラ賞「カラスライド部門」第2位受賞

2014年 2014年度アサヒカメラ賞「カラスライド部門」第3位受賞

第一原子力産業グループ
The **F**irst **A**tomic **P**ower **I**ndustry **G**roup

富士電機株式会社

富士通株式会社

株式会社みずほ銀行

清水建設株式会社

双日株式会社