

令和 4 年 6 月 20 日現在

機関番号：32665

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K00279

研究課題名(和文) 高速増殖炉の廃止措置の歴史と国際比較

研究課題名(英文) History of decommissioning of first breeder reactors and its international comparison

研究代表者

小島 智恵子 (KOJIMA, Chieko)

日本大学・商学部・教授

研究者番号：70318319

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：フランスとドイツの高速増殖炉(FBR)廃止措置の歴史を調査した結果、フランスのFBR実証炉スーパーフェニックスの廃止措置の背景には、仏原子力庁と仏電力の対立があったことを技術者へのインタビューと新資料により裏付けた。ドイツのFBR原型炉SNR-300の計画中止については、チェルノブイリ原発事故の影響の他に、技術的な問題によりSNR-300が臨界に達していなかったことを要因として提示した。仏独のFBR廃止措置の歴史を比較した結果、日本のFBR原型炉もんじゅの廃止措置の技術面に関しては、フランスの廃止措置を参考にしても、核燃料サイクル政策については、抜本的に問い直すことを提言した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

学術的意義は、既存研究では扱われていないフランスとドイツのFBR廃止措置の歴史についてインタビューや新資料を基にその詳細を明らかにしたことである。

社会的意義の第1点目は、仏独のFBR廃止措置が日本のFBR原型炉もんじゅの廃止措置に与える影響を分析したこと、第2点目は、日本のFBR開発に関して廃止措置を前提に検討することを提言したことである。2022年1月に、アメリカテラパワーとアメリカエネルギー省のFBR開発計画にJAEAなどが参加することが発表された。新規にFBRを開発するということは、将来的にFBRの廃止措置に至るということを本研究により実証的に示したことは時宜に適っていると考える。

研究成果の概要(英文)：Based on research about the history of decommissioning of Fast Breeder Reactor (FBR) in France and Germany, this study revealed the following points. It is shown that there was a conflict between French Atomic Energy Commission and Electricity of France for the decision-making across the decommissioning of SPX (FBR demonstration reactor) by interviews with French nuclear engineers as well as new documents. As for the abandon of German SNR-300 (FBR prototype reactor) development program, some technical problems which had precluded its critical state, was also a reason to cancel its project, in addition to the impact of Chernobyl nuclear disaster.

Considering the Franco-German history of decommissioning of FBR, Japan will probably refer to French decommissioning technology for its Monju (FBR prototype reactor). But Japanese nuclear fuel cycle policy should be different from French policy, and it is now time to review it fundamentally.

研究分野：科学技術史

キーワード：科学技術史 原子力 高速増殖炉 放射性廃棄物 廃止措置

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

高速増殖炉は、使用済核燃料からウランとプルトニウムを抽出して再利用する核燃料サイクルの中核として位置づけられる。研究開発当初、世界で約 30 基が開発されていたが、そのうち 4 基が計画中止となり 11 基が廃止措置となっていた。また、本研究の申請年、2018 年 3 月に日本の高速増殖炉原型炉もんじゅの廃止措置計画が認可された。2018 年 5 月 11 日に会計検査院が国に報告した内容によると、もんじゅの研究開発費には 1 兆 1313 億円が投じられながら、稼働による技術成果の達成度は 16%にとどまった。さらにもんじゅの廃止措置工程は、2047 年度までとされ、原子力規制委員会が発表した廃止措置予算は約 3750 億円であった。一方、日本における高速増殖炉の廃止措置は初めてのことであり、日本原子力研究開発機構(以下 JAEA)は、既に廃止措置に入っている海外の事例を参考に作業を進める方針であった。このように研究開発当初、もんじゅの廃止措置は喫緊の課題であり、海外の高速増殖炉の廃止措置の事例を歴史的に分析することが、その解決策の一つになると考えた。そして、世界で高速増殖炉開発を最も推進してきたフランスと、高速増殖炉開発推進政策から転向し、開発中止を決定したドイツの廃止措置過程を主たる調査対象とし、両国の比較と日本への影響を分析することに着手した。

### 2. 研究の目的

本研究の第一の目的は、フランスとドイツの高速増殖炉廃止措置の歴史的変遷を明らかにすることである。即ち、単に高速増殖炉廃止措置技術の現状を調査するだけでなく、歴史的的手法によって分析することである。既存研究では、廃炉や解体技術を工学的に扱うなど、ある専門分野での廃止措置を論じているが、本研究は、原子力工学・技術史・国際比較という極めて学際的な視点で廃止措置問題を議論する。

第二の目的は、2011 年の福島第一原子力発電事故後も原子力推進政策を維持しているフランスと、原子力撤退の政策を打ち出したドイツとの比較を行うことである。EU の中核をなす両国が、原子力政策に関して全く異なる方針をとることになった理由について高速増殖炉廃止措置を事例とし実証的に裏付ける。

第三の目的は、本研究の対象であるフランス・ドイツの高速増殖炉廃止措置から、もんじゅの廃止措置に対する知見を得ることである。実際、資源エネルギー庁は、もんじゅの廃止措置に関連してフランスの廃止措置を参考としてあげている。さらに高速増殖炉は軽水炉よりも高度な廃止措置技術が求められるので、放射線量が高い設備内での遠隔操作技術等は福島第一原発の廃止措置にも研究成果が応用されると期待される。

### 3. 研究の方法

本研究の方法は、資料収集、現地視察とインタビューを基に廃止措置の歴史を実証的に裏付けることである。

#### (1) 資料収集について

2019 年度は海外出張が可能であったため、フランス原子力庁(以下 CEA)アーカイブズ、フランス国立図書館、パリ国立高等鉱業学校にてフランス原子力庁年次報告書と高速増殖炉廃止措置に関する文献を収集した。しかし 2020 年度以降はコロナ禍のため、海外での資料収集が不可能となった。そこで、フランスについては、CEA アーカイブズのアーキビストに個人的に資料を依頼し、フランスの高速増殖炉廃止措置に関する資料を入手した。また、フランスの高速増殖炉実証炉スーパーフェニックスが建設されたクレイ-マルビルサイトの元所長で、スーパーフェニックスの建設から廃止措置に至るまで関わったピエール・シュミット氏から同氏所有の画像を含むスーパーフェニックス資料を頂戴した。

ドイツについては、IAEA の公開資料、ドイツ連邦環境・自然保護・原子力安全省、ドイツ連邦放射線防護庁、ドイツ連邦経済・エネルギー省、カールスルーエ工学研究所、ドイツ原子力学会、ドイツ原子力フォーラムのサイトを活用し、可能な限り資料を収集した。

#### (2) 現地視察とインタビュー

(コロナ禍の影響で、予定していた現地視察は全て中止となったが、2018 年までにフランスの高速増殖炉原型炉フェニックスのマルクールサイトにおける廃止措置とスーパーフェニックスのクレイ-マルビルサイトにおける廃止措置に関しては視察を済ませていたので、これらのサイトに連絡を取り、その後の状況について調査をした。

インタビューについては、フェニックスの再稼働の責任者で廃炉措置直前までマルクールサイトでフェニックス研究に関わっていたジョエル・ギデ氏と上記のピエール・シュミット氏に対して、メールとオンラインでインタビューを実施した。

### 4. 研究成果

#### (1) フランスの高速増殖炉廃止措置の歴史

本研究では、フランスの高速増殖炉の廃炉措置の歴史を調査したが、既存研究においてその歴史の詳細を論じたものは、これまで調べた限りではない。その概要は以下の通りである。

##### ① ラプソディー(試験炉・熱出力 40MW, 4 万 kWe)

ラプソディーは 1968 年に臨界に達したフランス初の高速増殖炉で、南仏のカダラシュに建設され、

1983 年まで稼働していた。廃止措置計画は、完全解体を目標として 1984 年に開始したが、1986 年に原子炉本体の密閉処置状態を目標に、1991 年に原子炉圧力容器閉じ込め作業を行い、1990 年から 1993 年に一次 Na 系解体作業等を開始し、回収 Na の処理を含め、原子炉本体の密閉処置状態を 1994 年に達成した。

回収 Na の安定化処理には、NOAH 法が開発され適用された。2006 年に発足した原子力安全機構(以下 ANS)への安全レポートの提出により、許可後 5 年以内の解体が可能となり、2030 に廃止措置を完了させる計画である。

## ② スーパーフェニックス(実証炉・熱出力 3,000MW, 124 万 kW<sub>e</sub>)

本来、フランスの高速増殖炉の廃止措置の順序は、試験炉ラプソディー、原型炉フェニックス、実証炉スーパーフェニックスとなるはずであったが、スーパーフェニックスの廃止措置の方がフェニックスよりも先に決定した。スーパーフェニックスは、実証炉として建設され、1985 年から運転を開始したが、1987 年・1990 年に Na 漏れ事故により稼働を停止した。1994 年に用途を研究炉に変更したが、1996 年 12 月に再度停止し、最終的には経済的・政治的理由により、1998 年 12 月に閉鎖が決定された。その後、炉心から約 600 体の燃料が取出され、1999 年から 3 年間かけて 1 次及び 2 次系の Na が抜き取られた。

21 世紀になると、フランスでは原子力に関する法令が整備され、廃止措置の方針も変更された。まず、スーパーフェニックスの建設管理運転会社であるフランス電力(以下 EDF)が、それまでの遮蔽隔離期間 50 年を短縮し、解体撤去を早める方針を出した。そして、2006 年には「原子力の透明性と安全性に関する法律(TSN 法)」が成立し、政府から独立した行政機関として ANS が発足した。そして ANS は技術的、財政的に将来の世代に負担をかけるべきではないとの観点から、安全貯蔵や遮蔽隔離ではなく、即時解体を事業者に勧告した。そこでスーパーフェニックスについては、2006 年に解体許可が出され、2012 年までに主要設備建屋以外のすべてを解体した。2009 年から 2017 年に Na の除去・処理を行い、2017 年に Na の処理を完了した。その後遠隔解体操作により、原子炉本体を解体し、2025 から 2030 年には解体を完了する予定である。

スーパーフェニックスの廃止措置決定に関しては、1997 年 6 月に誕生した社会党のジョスバン連立政権に加わった緑の党の要求を受け入れたという政治的要因が大きいというのが通説である。本研究では、スーパーフェニックスの建設・管理・運転に携わった EDF が、多額の研究費を必要とするスーパーフェニックス開発に消極的であり、高速増殖炉開発を推進し続けてきた CEA と対立していたという事実を EDF のスーパーフェニックス建設責任者へのインタビューにより明らかにした。

## ③ フェニックス(原型炉・熱出力 560MW, 25 万 kW<sub>e</sub>)

フェニックスは、1973 年に臨界に達しており、1994 年には 20 年間の設計寿命に至ったが、1998 年 12 月にはスーパーフェニックスの閉鎖が決定したので、その代役をフェニックスが請け負うことになった。具体的には、マイナーアクチノイドや長寿命放射性廃棄物の核変換実験を行ったが、そのためにはフェニックスに対して安全上の改造や補強工事を行う必要があった。その改造・補強工事は 1996 年から開始され 2003 年にはフェニックスが再稼働された。その結果、2009 年までフェニックスの寿命は延長され、2009 年 3 月に通常運転を終了した。2010 年からは、使用済燃料の取り出しと Na の抜き取り、Na 処理施設等を準備し、2030 年の解体を目指している。フェニックスは長期にわたり使用されてきた高速増殖炉ということで 1997 年 9 月にはアメリカ原子力学会から Nuclear Historic Landmark に選ばれた。しかし、その背景にはスーパーフェニックスが廃止措置になったため、フェニックスが稼働せざるを得なかったという事情があった。

## (2) ドイツの高速増殖炉廃止措置の歴史

ドイツでは 1955 年から原子力研究が開始され、1959 年に「原子力エネルギー法」が制定されて以降、原子力を推進してきたが、1986 年のチェルノブイリ原発事故を経て 21 世紀には脱原子力政策へと転向し、2002 年には「原子力エネルギー法」が改正された。その間、高速増殖炉開発に関しては、1966 年にカールスルーエに高速臨界実験装置 SNEAK が設置され、1972 年に試験炉 KNK-II が臨界に達し、1978 年には発電を開始したが 1991 年に運転を終了した。1973 年カールスルーエに原型炉 SNR-300 の建設が開始し、1988 年には建設がほぼ終了していたが、1986 年のチェルノブイリ原発事故の影響を受け、ノルトライン・ヴェストファーレン(以下 NRW)州政府の許可が下りず、臨界に達することなく 1991 年に閉鎖が決定した。

高速増殖炉研究に関してドイツは 1965 年からベルギーおよびオランダと研究協力を進め、1968 年には研究協力協定を締結した。SNR-300 の管理および運転も 3 国の資本によって設立された高速増殖炉発電会社(以下 SBK)で行われていた。SBK は連邦政府の指導を受け、1987 年 12 月に建設許可申請を行ったが、NRW 州が許可しなかったため、連邦政府は 1988 年 4 月、連邦による監督規定に基づき NRW 州相に SNR-300 の許認可促進指示を発した。しかし、NRW 州はこの指示にも従わなかったため、1988 年から法的論争となり、最終的に連邦憲法裁判所は 1990 年 5 月、NRW 州に対して SNR-300 の認可手続きを進めるよう裁定を下したが、NRW 州は認可手続きを進めることを拒否した。

1991 年にカールスルーエにて KNK-II の閉鎖が決定後、1993 年から廃止措置が実施されてきたが、連邦政府 100% 所有の国有会社エネルギー・ノルト社(以下 EWN)傘下に移管され、EWN 子会社であるカールスルーエ原子力施設バックエンド会社(以下 KTE)により、廃止措置が進められている。KNK-II では、廃止措置を 10 段階に分けて実施しているが、2019 年 7 月に第 9 段階まで進んでおり、最終段階となる第 10 段階廃止措置許可を州政府に申請した。原子炉建屋内の設備解体は 2003 年に開始しているが、KNK-II では、冷却材として使用されたナトリウムが残留している部分があり、ナトリウムの発火を避けるため、窒素ガスを充満させた状態で解体された。今後行われる廃止措置の最

終段階では、残りの補助施設の解体や、汚染された機器の撤去、除染が行われたのち、通常の構造物として解体され、廃止措置が完了する。

なお、SNR-300については、燃料を装荷以前に計画が中止されたため、原子力施設として取り扱う必要がなく、1995年にオランダの実業家に売却され、現在は原子力発電所の建屋を活かした遊園地・宿泊施設として使用されている。

### (3) フランスとドイツの廃止措置の比較

フランスとドイツの高速増殖炉の廃止措置に至る経緯の差は両国の原子力政策から生じている。フランスとドイツの根本的な違いとして、核保有の有無と中央集権と地方分権との差が挙げられるが、ドイツとは異なり、フランスが極端な原子力推進政策を遂行してきた背景には、核物理学研究の伝統と蓄積、テクノクラートの存在がある。スーパーフェニックスの廃止措置に関しては、政治的理由が一つの要因になっていたが、ドイツの連邦政府と NRW 州との法的論争とは質の異なるものであった。一般にドイツの反原発への転向の契機は、チェルノブイリ原発事故であったと言われているが、高速増殖炉開発に焦点を当てると、同原発事故以前に技術的な問題で高速増殖炉の原型炉が臨界に達していなかったという点も転向の要因に含まれていたと考える。

一方、フランスとドイツの高速増殖炉廃止措置においては、相違点だけでなく、共通点や相互の影響があった。スーパーフェニックスはフランスの独自開発ではなく、EDF が 51%、イタリア電力公社が 33%、残りの 16%は SBK が出資して設立された NERSA により運営されていたので、スーパーフェニックスの廃止措置決定には、ドイツの高速増殖炉の閉鎖の影響があったことは否めない。また廃止措置の方法に関して、フランスは、当初、長期遮蔽隔離期間を設けていたが即時解体に転じ、ドイツも即時解体が大分部を占めている点で基本的には共通しており、ドイツの廃止措置に関してはフランスの AREVA 社(現 Orano)も関わっている。

### (4) 日本への影響

フランスとドイツの高速増殖炉廃止措置の歴史を比較した結果、技術的にはフランスがドイツを凌いでおり、ドイツも廃止措置に関してはフランスの AREVA 社(現 Orano)の協力を得ていることが示された。もんじゅの廃止措置に関しては、高速増殖炉原型炉フェニックスと実証炉スーパーフェニックスの廃止措置実績を持つフランスから技術的支援を受けると推測される。福島第一原発事故後、フランスの専門家が原子力損害賠償・廃止措置等に関する JAEA 及び東京電力の国際アドバイザーになっていることからこの点が裏付けられる。

使用済核燃料を再処理して得られるプルトニウムを使用して発電する高速増殖炉開発の将来を考察することは、日本の核燃料サイクル政策を抜本的に問い直すことにつながる。もんじゅの廃止措置決定後、日本はフランスの高速増殖炉実証炉 Astrid 計画に参加していたが、2019年に Astrid 計画が資金難を理由に凍結したため、2019年末に日仏協力に関する取決めを完了した。その後 2022年1月には、アメリカテラパワーとアメリカエネルギー省の高速増殖炉開発計画に、JAEA などが参加することが発表された。新規に高速増殖炉を開発するということは、いずれ高速増殖炉の廃止措置を実施するということである。フランスとドイツの高速増殖炉廃止措置の歴史的な分析から、日本の高速増殖炉開発については「革新的技術を開拓し電力を生産する文化」から「放射性廃棄物を処理・処分する文化」への移行を提言する。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Chieko KOJIMA	4. 巻 31(2)
2. 論文標題 Early History of the Nuclear Fuel Cycle in France-The Honeymoon Era of Raduactive Waste Reprocessing and Fast Breeder Reactors	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Historia Scientiarum	6. 最初と最後の頁 128-152
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 小島智恵子	4. 巻 27(1)
2. 論文標題 日本における「物質波理論」の受容	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 総合文化研究	6. 最初と最後の頁 1-23
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 小島智恵子	4. 巻 Vo..75, No. 8
2. 論文標題 少数派物理学者としてのド・ブロイ	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本物理学会誌	6. 最初と最後の頁 509-512
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Chieko KOJIMA	4. 巻 Vol.29, No.3
2. 論文標題 The Acceptance of de Broglie 's Matter Wave Theory in Jap	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 HISTORIA SCIENTIARUM	6. 最初と最後の頁 260-279
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Chieko KOJIMA	4. 巻 vol 7., No.1
2. 論文標題 France 's Marcoule Nuclear Site: A History of Transition from Military to Civilian Use	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 AJP	6. 最初と最後の頁 31-54
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計9件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 小島智恵子
2. 発表標題 仏原子力開発における確執-仏原子力庁と仏電力
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小島智恵子
2. 発表標題 高速増殖炉開発の歴史に関するフランスとドイツの比較
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小島智恵子
2. 発表標題 高速増殖炉開発における国際協力の歴史
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小島智恵子
2. 発表標題 De Broglieに影響を受けた日本人物理学者
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小島智恵子
2. 発表標題 フランスにおける放射性廃棄物再処理の歴史
3. 学会等名 化学史学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小島智恵子
2. 発表標題 ド・ブロイに師事した日本人物理学者
3. 学会等名 日本科学史学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小島智恵子
2. 発表標題 日本におけるde Broglie物質波概念の受容
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小島智恵子
2. 発表標題 フランスにおける原子力発電廃炉の歴史
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小島智恵子
2. 発表標題 日仏原子力協定に至る歴史的背景
3. 学会等名 日本科学史学会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計3件

1. 著者名 小島智恵子, 斎藤憲, 小長谷大介, 高橋憲一, 古川安, 小川眞里子, 三浦伸夫, 矢野道子他	4. 発行年 2021年
2. 出版社 丸善出版	5. 総ページ数 726
3. 書名 科学史事典726	

1. 著者名 小島智恵子, 若尾祐司, 木戸衛一, 北村陽子, 中野麻伊香, 高橋博子, 市川浩, 友次晋介, 佐藤温子, 川口悠子, 和田喜彦, 山本昭宏, 後藤宣代, 藤岡毅, 山内友也, 竹本真希子	4. 発行年 2021年
2. 出版社 昭和堂	5. 総ページ数 448
3. 書名 核と放射線の現代史	



1. 著者名 小島智恵子,川口 茂雄,越門 勝彦,三宅 岳史,相澤伸依,大沢健夫,子安増生,永井晋,藤田茂他	4. 発行年 2020年
2. 出版社 ミネルヴァ書房	5. 総ページ数 442
3. 書名 現代フランス語哲学入門	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------