

炉物理部会セッション

実験炉・研究炉による炉物理研究の将来

Future of reactor physics study on experimental and research reactor

(3) 実験炉・研究炉を活用した炉物理研究の将来に対する問題提起

(3) Raising of issues on future of reactor physics study utilizing experimental and research reactor

*Van Rooijen, Willem F.G.¹¹ 福井大学附属国際原子力工学研究所

1. 背景 この論文では提案されている「福井炉」について議論する。「福井炉」というのは新しい試験研究炉の建設を目的とする事業である。しかしながら、この事業は多くの側面、特に研究目的と運営組織についてまだ不透明な状態である。既に決まっている点は原子炉の場所（敦賀半島の「もんじゅサイト」）と原子炉の出力（1 万 kW～2 万 kW）である。原子力安全研究協会の報告書 [1] では「福井炉」として伝統的な高中性子束炉が提案されている。原子炉物理学の観点から見て、高中性子束炉は伝統的な技術であるので、本稿では技術（炉心設計等）について議論しない。この論文では、原子炉物理学と関係のない、「福井炉事業」の成功に大きな影響があると思われる下記の 4 つの課題について述べる：

- 日本における原子力発電事業の将来
- 原子力の推進とその研究開発における国の政府の責任
- 政治的とその他の境界条件による企業のリスク
- 「コンソーシアム式」の研究開発と長期化のリスク

2. 議論

2-1. 日本における原子力発電事業の将来 日本政府の現在の方針で、2030 年に電力の約 20%を原子力発電で賄おうとしている。しかし、その目標は達成できないだろう。2019 年時点で、原子力の発電量は 63,779GWh で、国内の発電量に対して数パーセント程度しかなかった（図 1）。この状態は 2030 年までに大きく変わる見込みがないと推測される。

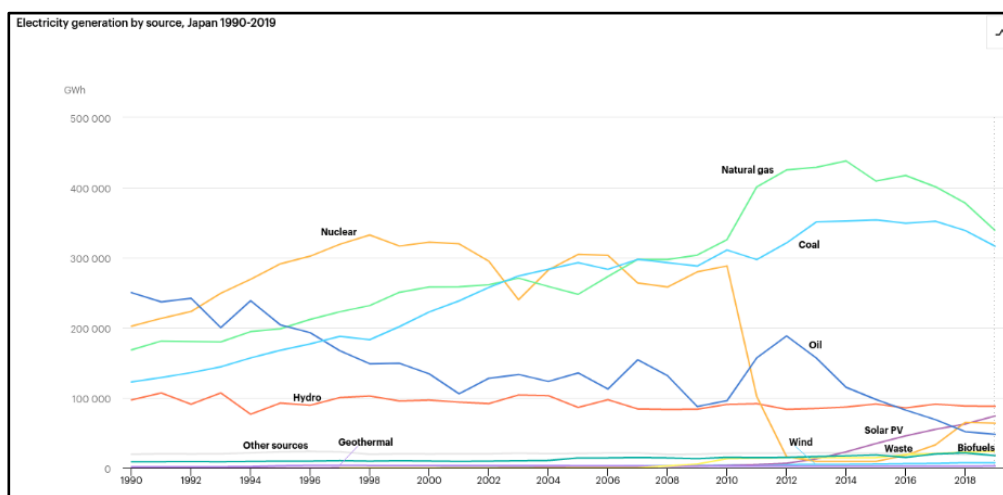


図 1：日本における発電のエネルギー資源割合。2019 年の原子力発電を歴史的な原子力発電と比べると：2010 年に 288,230 GWh、1996 年に 332,343 GWh。2019 年の原子力による発電量は太陽光発電量より少なかった。（source: International Energy Agency）

*Van Rooijen, Willem F.G.（ファン ローイエン ウィレム）

¹Research Institute of Nuclear Engineering, University of Fukui, Tsuruga.

福島第一原子力発電所の事故以来、原子力に対して「新規規制基準」が発令された。原子力発電所、原子力関連施設を有する企業・機関は多額の投資により施設の工事等を行い、新規性基準への適合を目指している。新規性基準適合のための総投資額は不明であるが、現在の概算量として 10 兆円は必要であると言われている [2]。日本国の人口で計算すると、1 人当たり 8 万円になる。日本の国民と企業は、その金額を電気代で払う。既存の原子力発電所改善のために莫大な金額を使うので、経済的な実態として、既存の原子炉をできるだけ長く運転することを余儀なくされている。政府は原子炉が 40 年間の運転を終了した後で、できるだけ早く施設を建て替えるという計画を打ち出しているが、経済的にそのシナリオは不可能である。JAIF はすでに「既存システム利用の最適化」を推進しており [3]、80 年間までの運転延長について現在も検討が始まっている [4]。

原子力の経費について国際市場でも検討する必要がある。産業における工業生産法の「学習効果」によると、生産量が大きくなるほど経費は減少する。図 2 に米国とフランスの原子力発電所の「overnight construction cost」を示す。通常の工業生産法を異なり、国における原子力発電の量が大きくなるほど、原子力の経費が拡大する。図 3 には、原子力とその他の発電技術の経費を示す。原子力の経費は国における原子力発電量が大きくなるほど拡大するが、その他の発電技術は通常通り、発電量が大きくなるほど経費が減少する。日本の将来の原子力発電所の建設経費は、図 3 で示すデータと大きく乖離しておらず、将来の原子力発電所の建設経費は法外な価格になる見込みである。

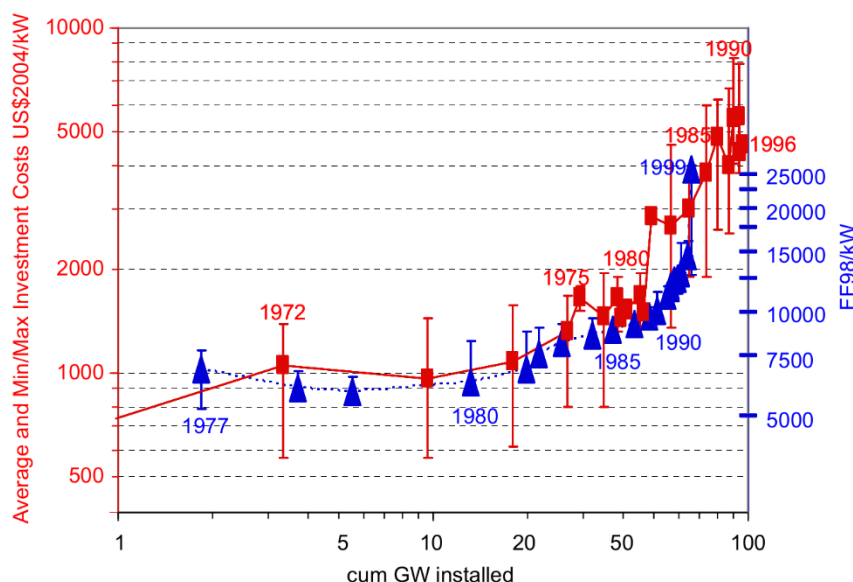


図 2：米国とフランスにおける原子力発電所建設経費の歴史的な発展。国における原子力発電機能が大きくなるほど、建設経費が高くなっている。[5]から

上記に議論に基づき、日本における原子力発電事業の 2040 年までの発展について、下記のとおりになると思われる：既存の原子力発電所は少なくとも 60 年間運転され、電力会社は原子力発電所の新設の予算を確保できないという推測の下、2040 年～2060 年の間に原子力は減少する見込みである。「福井炉」は 2035 年以前の運転開始は行われないため、「福井炉」の運転開始時は日本における“原子力の下り坂”の時代になる可能性が高い。

2-2. 原子力の推進とその研究開発における国の政府の責任 2019 年 12 月に大阪で開催された国際会議「RPHA19」では、日本、韓国と中国における臨界集合体と研究炉について、近畿大学・教授 橋本憲吾先生の発表があった。橋本先生の発表では、日本における臨界集合体施設 14 基と研究炉 16 基（計 30 基）が紹介されている。橋本先生のデータを表 I に示す [7]。

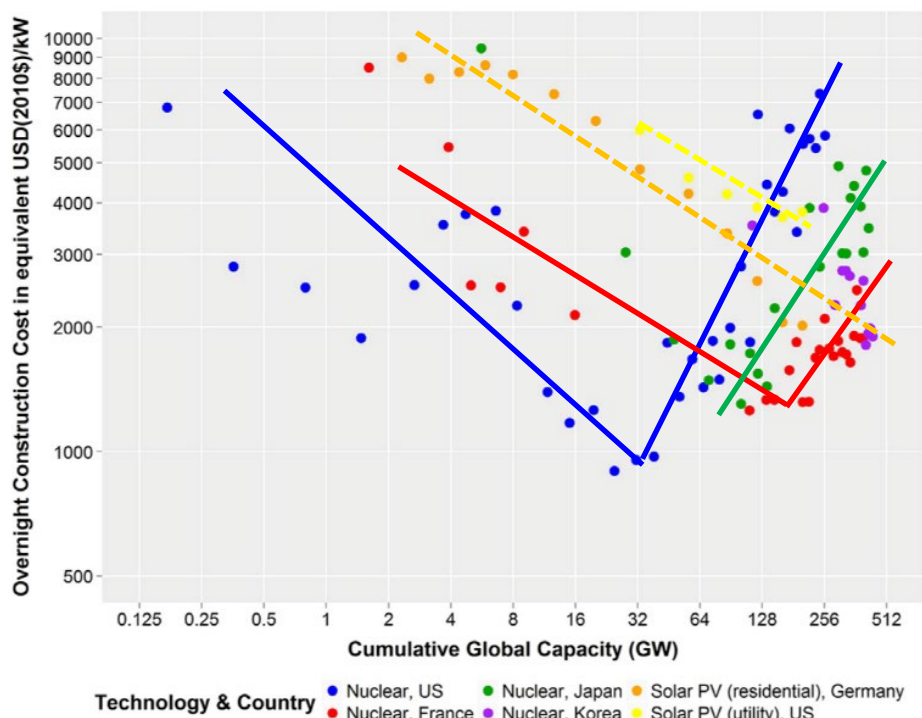


図3：原子力発電所建設経費の進展。米国、フランス、日本とともに、国における原子力発電機能が大きくなるほど建設経費は高くなる。現在、米国で建設中の APR-1000 「Plant Vogtle 3・4 号機」とフランスで建設中の EPR 「Flamanville-3」のデータが含まない。[6]から。

橋本先生のデータを解析すると、いくらか面白い特徴がある。1つ目は30施設の中の21基がわずか14年の間（1957年～1971年）に運転が開始されたということである。このような早い成長は既存企業と規制の少ない新しい市場の特徴である。原子力の導入の先端国（米国、フランス、ドイツ、英国）に同様な成長があった。2つ目は、複数の施設が民間企業（東芝、日立製作所、三菱重工、住友）に運営されたということである。この特徴も自由市場の概念に基づいて説明できる：民間企業として潜在的な市場を発見し、研究開発の施設への投資を決定した。

2021年には、日本の研究炉の豊かな歴史はほぼ消えた状態になった。臨界集合体の14基の中、1基しか残っていない（KUCA）。研究炉に対して、16基のなか、2021年に4基は運転可能な状態であり（UTR-KINKI, KUR, NSRR, JRR-3M）、後2基の再稼働に可能性がある（JOYO, HTTR）。橋本先生は発表において、日本に残っている研究炉、特に大学が運営している施設は経費の上昇により運転中止になる可能性があるとした。

そこで、原子力研究開発のための施設の確保の責任者について議論すべきである。現時点で、民間企業において原子力の研究施設の分担は研究開発と教育・人材育成の潜在能力より大きくなっているため、臨界集合体・研究炉を有する民間企業は存在しない。大学においても負担が大きく、2ヶ所以外の教育炉はすべて廃止された。普通の教育市場であるなら、UTR-KINKI の様な施設は20～30年前に建て替えられているはずである。教育用原子炉の収益は少なく、古い施設を継続的に運転する必要がある。つまり、教育のための原子炉・照射実験の原子炉は大学として経営できない施設になっている。

上記の状態であるので、「福井炉」は「国内戦略的な研究施設」の拠点、フランスの「Institut Laue Langevin」[8]と同様な基礎研究の施設として経営できる可能性がある。その場合、「福井炉」は基礎研究のための高強度中性子源としての役割を持つ。他の可能な運営方法として、民間企業の寄付金を経費に充て、教育・人材育成の施設として運営する。橋本先生の発表によると、60年前の日本では同様な例があった。

表 I：日本における臨界集合体と研究炉の状態。「青いハッチング」：1957 年～1971 年の間に運転開始のあった施設。「赤い」：運転停止、廃炉。「緑」運転中、運転可能。「黄」：再稼働の期待あり。[]から。

臨界集合体			研究炉・教育炉・照射炉		
Facility	Owner	Operation start	Facility	Owner	Operation start
AHCF	JAERI	1961.Jan.1	JRR-1	JAERI	1957.Aug.27
SHE	JAERI	1961.Jan.25	JRR-2	JAERI	1960.Oct.1
TCA	JAERI	1962.Aug.23	UTR-KINKI	Kindai Univ.	1961.Nov.11
OCF	Hitachi	1962.Oct.11	TRIGA-II	Rikkyo Univ.	1961.Dec.8
NCA	Toshiba	1963.Dec.11	HTR	Hitachi	1961.Dec.25
JMTRC	JAERI	1965.Oct.1	JRR-3	JAERI	1962.Jan.1
SCA	Sumitomo	1966.Aug.1	TTR	Toshiba	1962.Mar.13
FCA	JAERI	1967.Apr.29	Musashi	Tokyo C. Univ.	1963.Jan.30
MCF	Mitsubishi	1969.Aug.1	KUR	Kyoto Univ.	1964.Jun.25
DCA	JAERI	1969.Dec.28	JRR-4	JAERI	1965.Jan.28
KUCA	Kyoto Univ.	1974.Aug.6	JMTR	JAERI	1968.Mar.30
VHTRC	JAERI	1985.May.13	YAYOI	Tokyo Univ.	1971.Apr.10
STACY	JAEA	1995.Feb.23	NSRR	JAERI	1975.Jun.30
TRACY	JAEA	1995.Dec.20	JOYO	JAERI	1977.Apr.24
			JRR-3M	JAEA	1990.Mar.22
			HTTR	JAEA	1998.Oct.11

「福井炉」の目的が教育・人材育成であるとすれば、福井炉の経営費用は教育の結果を利用する者の責任となる（民間企業、規制庁、原子力機構）。「福井炉」の役割が「国内戦略研究施設」であるならば、国の交付金による経営は妥当と言える。

2-3. 政治的とその他の境界条件によるリスク 世界の初の第 4 世代液体金属高速炉の設計と建設を目的としたフランスの原子力庁 CEA が運営した「ASTRID 計画」は 2019 年に中止になった。ASTRID 計画は、予算は 850 億円であり、600 人と企業 11 社、複数の国際協力協定により 10 年間で実施されたが、失敗に終わった。2021 年に「ASTRID 計画」の崩壊を解析する論文が出版された [9]。解析の結果として、「ASTRID 計画」の崩壊には複数の原因があった。大きな影響があった原因は、政治的な支援と財務的な境界条件であった（[]から）：

”[...] in 2009, it was the CEA that fought for reviving SFRs through the funding of ASTRID in the framework of the national loan program. [...] The CEA understood that a window of opportunity was opening that was unexpected after two decades of waiting and uncertainty, and it was able to take advantage of it. [...] the decision to launch ASTRID itself was largely contingent on a political situation and the result of the successful strategy of a particular actor, namely, the CEA [...] The ASTRID project can be interpreted as having suffered from too much instability: instability of the project’s identity, of its deployment scale and dimension, of the objectives assigned to it, and finally, of the network of actors involved. [...] ASTRID was therefore, in a way, a revelation of the paradoxes of the so-called nuclear renaissance: [...] an industry that was expected to conform to the highest standards of quality, reliability and economic competitiveness, with organizations whose skills had been particularly eroded by long decades of activity at half-mast.”

「福井炉計画」は「ASTRID 計画」と比べたら十分小さいと言えるが、この計画の境界条件はとてよく似た状態であるので、「ASTRID 計画」の崩壊の原因について、参考すべきである。福島第1原子力発電所の事故ともんじゅの廃炉の引き続きで、「福井炉」を成功しなければ原子力業界の危機になると考えられる。

2-4. 「コンソーシアム式」の研究開発と長期化のリスク 現在「福井炉計画実施コンソーシアム」が提案されている。現在のメンバーは福井大学、京都大学と原子力機構であり、将来にその他の機関が参加する可能性がある。この「コンソーシアム式」の研究開発はヨーロッパの「EU Framework Program」と同様である：あらかじめ決められた研究計画に対し予算が発表され、予算を受け取る資格を持つ「パートナー」を「コンソーシアム」として招待する。個人的な経験によると、原子力施設の建設を目的とする「コンソーシアム」はほとんど実現しない。2000年から複数の「EU Framework Program」があった：ETDRとALLEGRO（ヘリウム冷却高速炉原型炉の開発）；ESLY, ALFREDとEFIT（鉛冷却核変換専用炉の開発）；GFR600とGFR2400（第4世代高温ガス高速炉の開発）；PDS-XADS（加速器機動システムの開発）。上記の研究開発の唯一の共通点は、原子炉として実現していないことである。「福井炉計画」はコンソーシアム式で実施すると、上記研究開発と同様に失敗する可能性がある。

もう1つの問題点は「期間」である。「ASTRID 計画」の失敗の原因の1点として、「期間のずれ」が指摘される。政治的な支援を得るために、短期間（可能であれば、4年間以内）で結果を出さなければいけないが、「原子炉」は、長期間の計画である（原子力発電所なら、100年間程度）。2000年には「世界の次世代炉の研究開発の推進」を目的とする「Generation-IV International Forum」（GIF）が発足した。GIFの目的は「2050年以降の原子力の研究開発」である。2020年にGIFは20周年を迎えた。20年間の研究開発として、莫大な数値解析が行われたが、第4世代の原子炉の道は20年前より不明になっている。長期間の研究開発はほぼ成功できないと考えられる。

3. 「福井炉計画」の成功のために 研究用原子炉について、橋本先生の発表[7]では次のように述べられている。：「The basic reactor theories, experimental and calculational methodologies have been developed in nuclear reactor laboratories such as CP-1, LA and others. Critical assemblies and research reactors such as CP-1, LOPO and Lady Godiva were the mother of “Reactor Physics”」。福井炉の研究目的はまだはっきり決まっていない状態であり、原子炉物理学分野として期待できるかどうかまだ不透明な状態である。上記の議論に基づいて、「福井炉」を成功する境界条件がはっきり理解できる：研究の目的を決定すべきであり、コンソーシアム式ではなく、しっかりした専門組織で計画を実施すべきである。また、長期間のスケジュールを避ける必要がある。さらに、政治的な問題を良い方向にマネジメントする必要がある。そして、原子炉物理学の専門家として対等なパートナーとして事業に参加すべきである。

参考文献

- [1] 原子力安全研究協会、「もんじゅサイトを活用した新たな試験研究炉に関する調査」（令和2年3月）
- [2] The World Nuclear Industry Status Report 2020, p. 160 sqq. (2020)
- [3] 電気新聞、「2030年既存原子力を最大活用」（2021年4月15日）
- [4] Kyodo News, “Japan mulls extending maximum nuclear reactor lifespan beyond 60 years” (2021年7月16日)
- [5] Arnulf Grubler, “The cost of the French nuclear scale-up: A case of negative learning by doing”, *Energy Policy* **38**, pp. 5174 – 5188 (2010)
- [6] Jessica R. Lovering, Arthur Yip, Ted Nordhaus, “Historical construction costs of global nuclear power reactors”, *Energy Policy* **91**, pp. 371-382 (2016)
- [7] Kengo Hashimoto, “A prospective miserable destination of ‘Reactor Physics’ in a certain country with no critical assembly and no research reactor”, RPHA19 Closing Session (2019)
- [8] Institut Laue Langevin, “Neutrons for Society”, <https://www.ill.eu/>
- [9] Stéphanie Tillement and Frédéric Garcias, “ASTRID, Back to the Future: Bridging Scales in the Development of Nuclear Infrastructures”, *Nuclear Technology*, pp. 1-21 (2021) <https://doi.org/10.1080/00295450.2020.1868892>