

2023 年度グラデュエーションペーパー
予稿

題 目	
原発業界をプラットフォーム戦略 で再生する条件とは	
技術経営論文	ビジネス企画提案

学籍番号	8822218	氏名	亀井一央
------	---------	----	------

教 員	
主査	若林秀樹 教授
担当審査委員	

「原発業界をプラットフォーム戦略で再生する条件とは」

【目次】

第 1 章 はじめに	1
1.1 筆者及び所属企業の紹介	1
1.2 研究の動機	2
第 2 章 研究の背景と目的	4
2.1 現状の原発業界の構造	4
2.2 国内原発業界を取り巻く環境	5
2.3 人材不足および技術力低下の現状とその影響	9
2.3.1 「人材」と「技術力」の定義	9
2.3.2 「人材」と「技術力」の現状	10
2.3.3 人材不足と技術力低下の影響	15
2.4 研究の目的	16
第 3 章 仮説	17
第 4 章 先行研究	19
4.1 一般的な B2C プラットフォームに関する研究	20
4.2 IoT 型プラットフォームに関する先行事例	25
4.3 原発以外の発電プラントへのデジタル技術の適用例	32
4.4 原発へのデジタル技術の適用に関する研究	33
4.5 先行研究・事例調査のまとめ	37
第 5 章 検証方法	38
5.1 課題の要因分析	38
5.2 サブ仮説への分解	40
第 6 章 検証結果	44
6.1 サブ仮説①の検証	44
6.1.1 原発プラットフォームの位置づけ	44
6.1.2 原発プラットフォームのコア取引	44
6.1.3 原発プラットフォームで扱う商品と課題解決との関係	50
6.1.4 原発プラットフォーム形成のための業界構造再編	54
6.1.5 協調領域と競争領域 ～Catena-X との比較より～	58

6.1.6	サブ仮説①検証のまとめ.....	66
6.2	サブ仮説②の検証	67
6.2.1	原発先進国の業界構造	67
6.2.2	原発業界の寡占度とイノベーションの関係	74
6.2.3	フランスと韓国の実例から見る業界寡占化の有効性.....	77
6.2.4	原発業界の寡占化と独占禁止法上の扱い	82
6.2.5	サブ仮説②検証のまとめ.....	86
6.3	サブ仮説③の検証	87
6.3.1	段階的統合のモデル.....	87
6.3.2	原発の関連のコスト構造の分析.....	88
6.3.3	段階的統合を踏まえた原発プラットフォームの定量価値評価	94
6.3.4	サブ仮説③検証のまとめ.....	103
第7章 検証を踏まえての考察.....		104
7.1	小型モジュール炉（SMR）の開発ブームの影響.....	104
7.1.1	SMR の特徴と現状	104
7.1.2	提案する原発プラットフォームでの SMR の扱い	109
7.2	国の GX 関連政策の原発プラットフォーム構想への影響	112
7.2.1	GX 経済移行債を活用した先行投資支援	114
7.2.2	成長志向型カーボンプライシングの導入	116
7.2.3	安全確保を大前提とした原子力の活用.....	119
7.2.4	長期脱炭素電源オークションの導入	121
第8章 まとめと今後の課題		123
8.1	まとめ	123
8.2	今後の課題	126
第9章 おわりに		127
9.1	あとがき	127
9.2	謝辞.....	127

第 1 章 はじめに

筆者は、原発メーカーである東芝エネルギーシステムズ(株)(以下、東芝 ESS)にて原子力発電関連事業に従事している。2011 年の福島第一原発事故(以下、1F 事故)以降、業界を取り巻く環境が激変しており、今後の原発利用推進にあたり、業界の先行きに強い危機感を覚えたていたことが本研究の動機である。

第 2 章 研究の背景と目的

2.1 国内原発業界を取り巻く環境

原発業界は、電力会社 11 社、原発メーカー 3 社、製造ベンダー数百社で構成されるサプライチェーン構造となっている^[4]。1F 事故をきっかけに多くの新規建設計画が中断し、また安全対策コストを理由に多くの原発が廃炉を選択した。近年、日本はエネルギー基本計画にて 2030 年に温室効果ガス排出量 46%削減(2013 年度比)の達成に向け、電源構成における原発比率 20~22%を目標とした^[1]。さらに 2050 年カーボンニュートラル実現に向けた「GX 実現に向けた基本方針」を策定し、原発利用推進の方針を掲げた^[2]。

一方、足元 21 年度の原発比率は 7%程度^[2]であり、エネルギー基本計画を達成するためには業界のさらなる活性化が必要だが、人材不足および技術力低下の課題に直面している。

2.2 人材不足および技術力低下の現状

本研究で扱う「人材」と「技術力」は、図 1 の赤枠内とする。図 2 の通り原発関連就職説明会に来場した学生数は、1F 事故をきっかけに激減した。図 3 の通り原発メーカーにおいては新規建設経験者の高齢化が進んでいる。また図 4 の通り 1F 事故後に原発業界から撤退した製造ベンダー数が年々急増している。

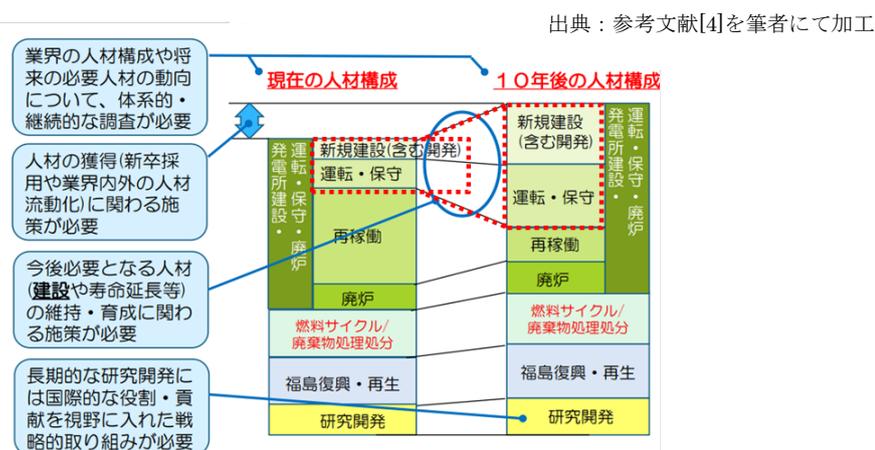


図 1 原発業界の人材の分類と今後の人材育成の方向性

出典：参考文献[3]を筆者にて加工



図 2 原発関連企業への就職活動状況

出典：参考文献[4]



図 3 原発メーカーの新規建設経験者の年齢分布

出典：参考文献[4]

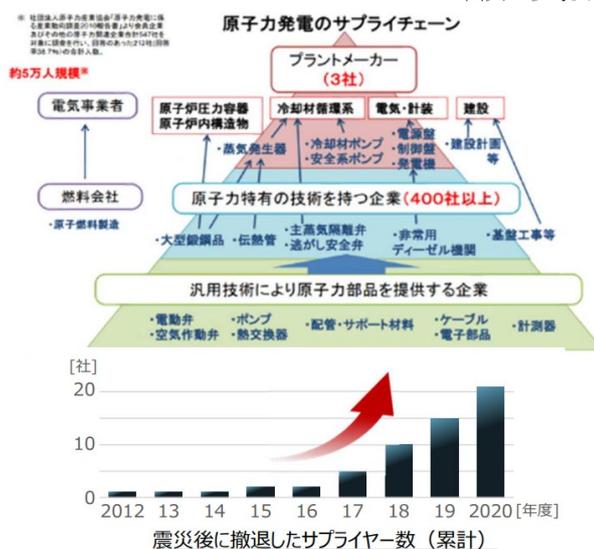


図 4 1F 事故後に原発から撤退した製造ベンダーの数

2.4 研究の目的

原発を継続利用するためには、人材不足および技術力低下の課題解決が急務であり、これを解決するための業界再編や新規ビジネスモデルについて検討することを目的とする。

第3章 仮説

原発業界は多数の企業からなるサプライチェーン構造であること、また日々の発電、保全、設計等の活動を通して日々大量のデータが生成されているが十分に利活用されていない現状に着目し、以下を仮説として設定した。

【仮説】

電力会社、原発メーカー、製造ベンダーをプラットフォームで繋ぐ業界構造への転換ができれば、人材不足および技術力低下の課題を解決できるのではないか？

ここで言うプラットフォーム（以下、PF）は、GAFAM の B2C PF とは異なり、原発内の「もの」から得られるデータで企業間をつなぐ IoT 型 B2B PF である。

第4章 先行研究

関連する先行研究^{[22][23][6][7][11][10]}の調査を行ったが、原発業界に PF モデルを適用する先行研究は見当たらなかった。一方で火力発電所に対しては、データを活用したデジタル技術の実装が進んでいる^{[8][9]}。これらの技術が原発未適用の主な課題は「他業界より厳しいセキュリティによるデータの採取や持ち出しの制限」や「巨大複雑系システムである原発への適用への有効性」等である^[10]。

第5章 検証方法

課題解決のためには、新規建設や既存炉の性能改善・寿命延長のための特殊機器製造、またこのための大規模新規開発の機会が必要である。しかしながら、廃炉増加による原発基数の減少や再稼働のための安全対策により、業界全体で稼ぐ力が低下し、新技術適用の機運が低下している。このため、業界全体でこれまで以上に利益を創出できる構造へ転換し、その利益によるイノベーションを創出・実現しやすい業界構造に再編していくことが必要である。これを踏まえ、仮説を以下の3つのサブ仮説に分解して検証していく。

- ① データを活用できる業界構造に転換し、電力会社売電益上昇とサプライチェーン間の取引コスト低減によりさらなる利益を創出することで、イノベーションへの積極的な投資を促すこと。
- ② 業界の寡占化を進め、人材や英知を結集することで、イノベーティブな新規製品を実用化しやすい体制の構築すること。

- ③ サブ仮説①と②の実現のために、小規模な統合から始め、徐々に同業他社も加えることで段階的に業界を寡占化していくこと。

第 6 章 検証結果

6.1 サブ仮説①の検証

6.1.1 原発プラットフォームのコア取引

PF を形成するためには、付加価値のあるネットワークの構築が必要である。現状、各社が持っている情報をクローズとすることによる情報の格差により取引コストが高く、非効率となっている（図 5 参照）。これらのデータをオープン化して新たな価値を各階層に提供することが必要である。これを踏まえた原発向けのデータサービスの案を表 1 に示す。これにより業界内の各社が Win-Win の関係を築ける可能性がある。

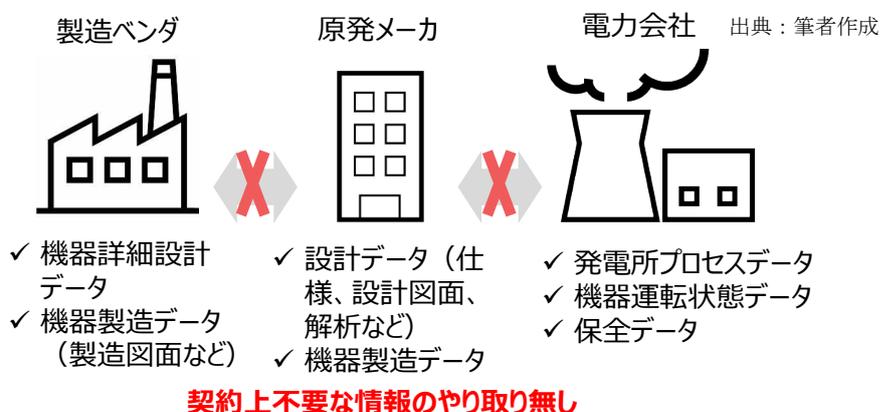


図 5 原発業界で生成されるデータと現状の共有状況

表 1 データを用いた原発向けサービスの案

出典：筆者作成

データ	データサービス	電力会社が見る価値	製造ベンダーが見る価値
原発運転・保全データ	<ul style="list-style-type: none"> ・発電性能向上のための最適な運転方法や改良工事の提案（出力、効率、稼働率改善等） ・設備保全のための最適な部品メーカーとのマッチング（仕様・時期・費用等） 	<ul style="list-style-type: none"> ・安価な電気の売電量増加による利益向上 ・保全費用の低減 	<ul style="list-style-type: none"> ・部品の提供機会増加による売上向上
メーカーの設計仕様・図面等	<ul style="list-style-type: none"> ・技術情報検索サービス ・電力会社・ベンダーからのアクセスログ分析による最適な提案 	<ul style="list-style-type: none"> ・技術情報入手の簡素化による効率改善により、本来業務への集中 ・調達コスト低減 	<ul style="list-style-type: none"> ・未参入電力会社への参画機会の創出 ・新規部品開発の機会創出

6.1.2 原発プラットフォームで扱う商品と課題解決との関係

前項のサービスが成り立つためには、取扱うのに適切な商品とある程度の市場規模が必要である。これを経営重心®の手法^[12]を用いて原発を構成要素に分解することで検討した（図 6）。この結果、「モジュラー」領域の製品が十分な市場規模で存在することを確認した。「モジュラー領域」の商品の提供を前項のサービスに載せて提供し、利益を稼ぎやすい業界構造とし、この利益を「すり合わせ領域」である新規建設や特殊機器の開発・製造に投資することで課題解決につながる見込みを得た。

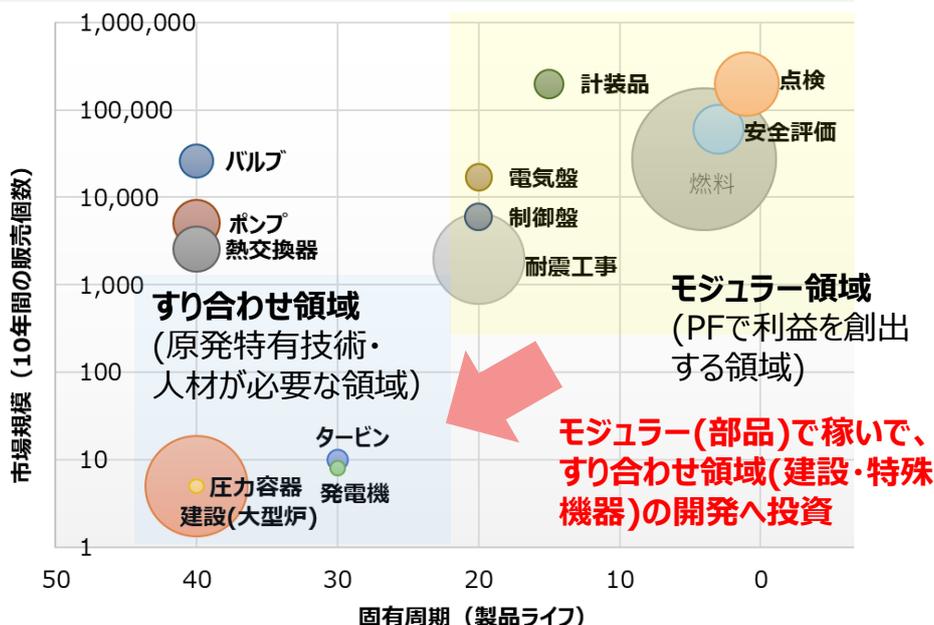


図 6 経営重心を参考とした原発構成要素の分解

6.1.3 原発プラットフォーム形成のための業界構造再編

前項のサービス提供には、データオープン化で課題となるセキュリティに配慮し、データの提供元・活用先である電力会社と原発メーカーが同じ方向を向き、かつ共同で責任を持つ合弁会社の設立が適切である。固定資産であるハード（発電所、工場など）の統合は迅速性・柔軟性に欠けるため、データを活用するソフト部分(人材やノウハウ)の統合が妥当である（図 7）。以上の構想をまとめた原発 PF の全体イメージを図 8 に示す。

出典：筆者作成

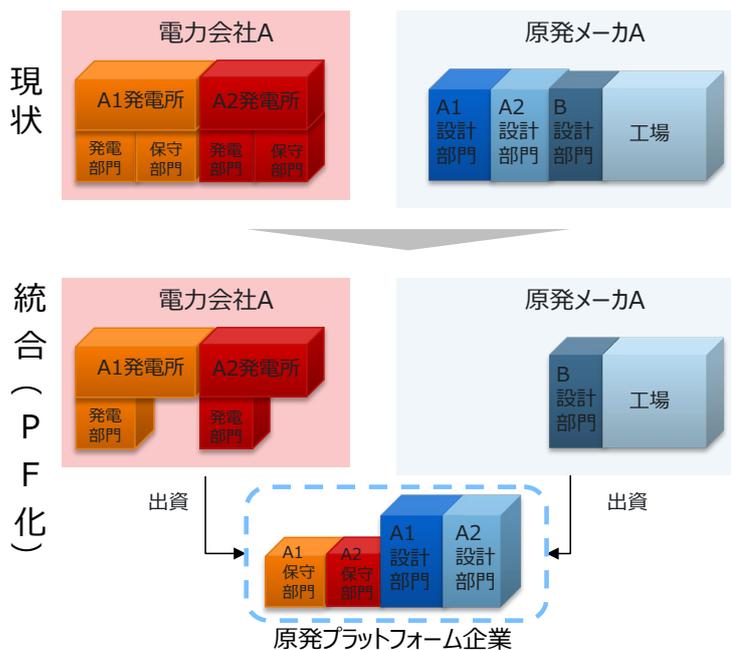


図 7 原発 PF 企業の最適な形

出典：筆者作成

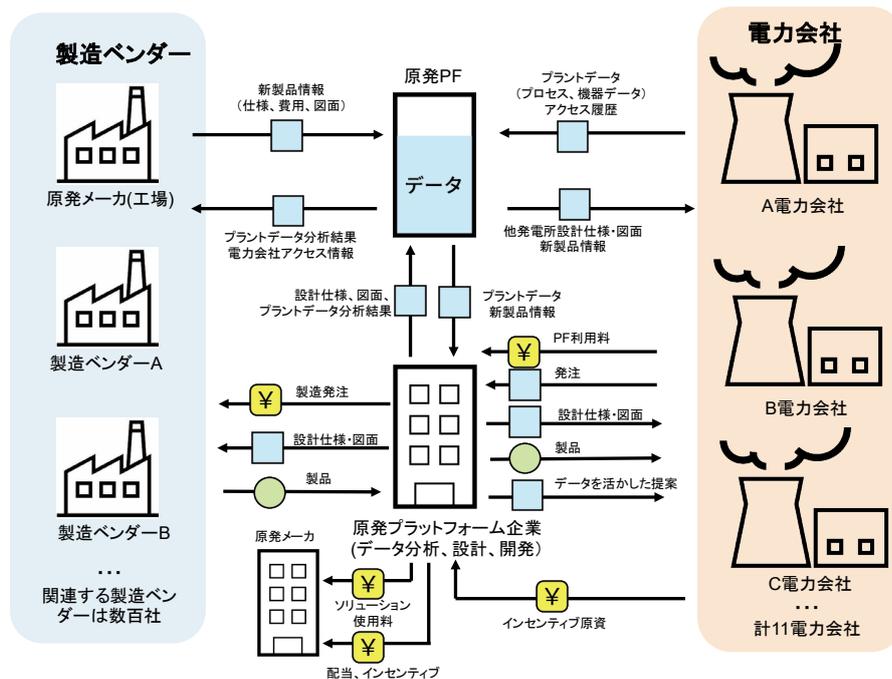


図 8 原発 PF の全体イメージ

6.1.4 協調領域と競争領域

本 PF で扱うデータのオープン/クローズ範囲について、Catena-X の事例を踏まえて検討した結果を図 9 に示す。基本的にデータをオープンとしつつも、ソリューションのアルゴリズムのみは原発メーカーに残してクローズとすることが適切である。

出典：筆者作成

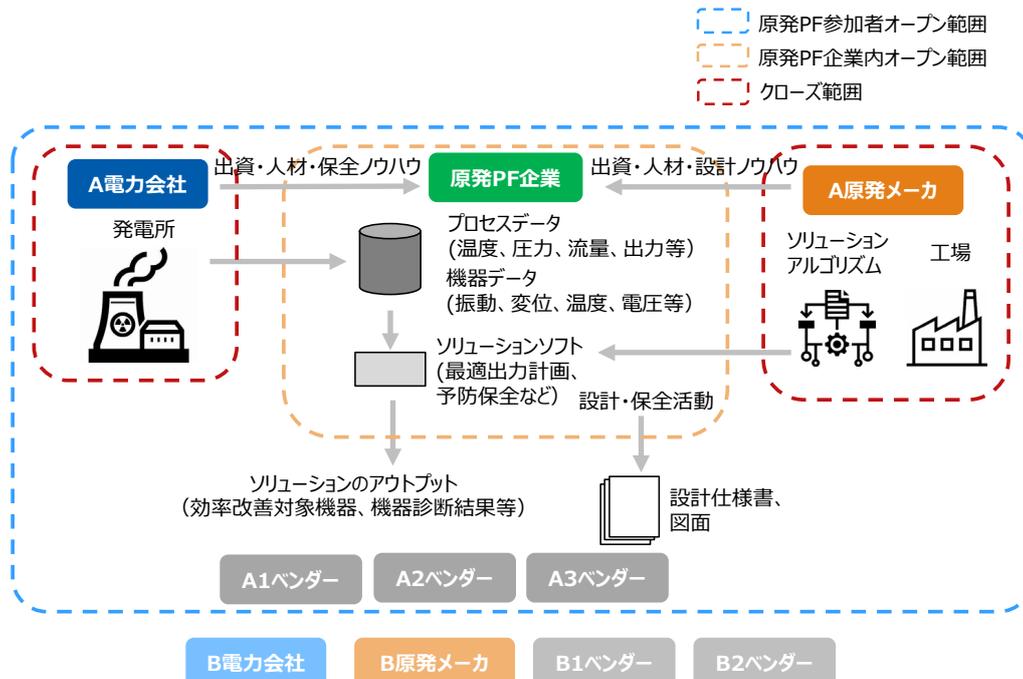


図 9 原発 PF におけるデータのオープン/クローズ

6.2 サブ仮説②の検証

6.2.1 原発業界の寡占度とイノベーションの関係

原発先進 6 カ国の業界国有化率と近年の新型原発建設基数を図 10 と図 11 に示す。図 10 より国有化率（寡占度）が高いほど、イノベーションの創出・実用化が進むと考えられる。また、単位人口あたりの基数である図 11 より、民主主義国家である韓国やフランスが今後の日本が進むべき方向の参考となる。

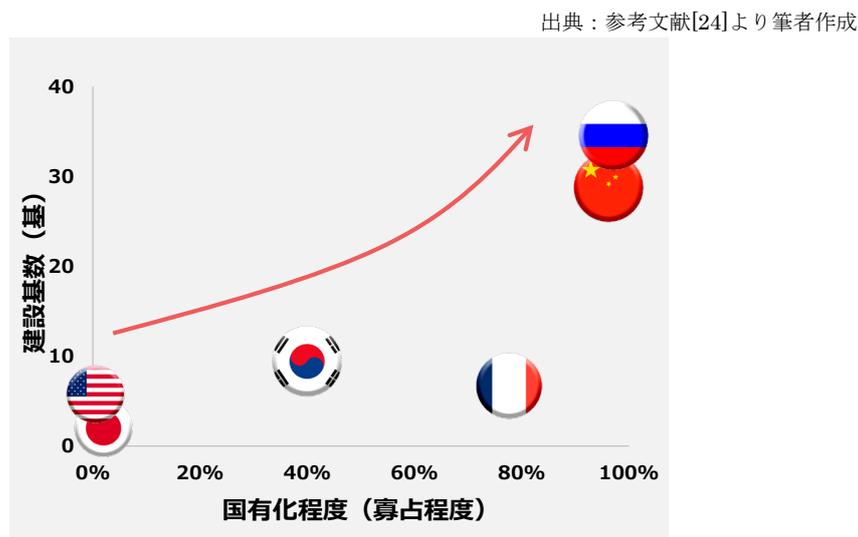


図 10 各国の原発業界国有化率と新型原発の建設基数

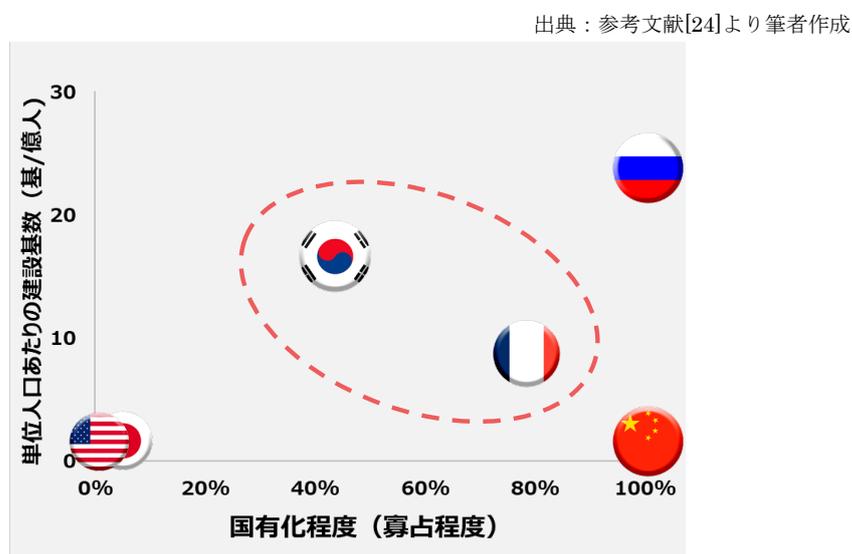


図 11 各国の原発業界国有化率と新型原発の単位人口あたりの建設基数

6.2.2 フランスと韓国の実例から見る業界寡占化の有効性

フランスと韓国の原発業界の状況を表 2 に示す。フランスは国主導で業界を再編し、

近年業績は好調である。韓国は国内および輸出ともに好調だが、図 12 に示す通り、韓国国内すべての電力事業を束ねる KEPCO では、国の意向もあり化石燃料費高騰の電気料金への転嫁ができず、赤字が続いている。国の資本が入りすぎることによる稼ぐ力の低下には注意が必要だが、大規模な寡占化にはある程度国の資本を入れた再編が必要と考える。

表 2 フランスと韓国の原発業界の状況

		フランス	韓国
業界構造	電力会社	EDF(仏政府85%)	KEPCO(韓国政府51%)、KHNP(KEPCO 100%)
	メーカー	フラマトム (EDF 76%,MHI19.5%)	KEPCO E&C(KEPCO65.8%) ⇒ 斗山重工業(民間)
電源構成の原発比率		約70%	約30%
状況の概観		✓ フランスは2010年代中盤までの新規建設の失敗による原発メーカー(旧アレバ)の大幅赤字で、国主導で業界再編で現在の構造へ。近年は業績好調。	✓ 韓国は長年この構造で変化なし。 ✓ 国内および輸出ともに原発業界は好調だが、KEPCO全体では、国の意向もあり化石燃料費高騰の電気料金への転嫁ができず、赤字続き。

出典：参考文献[13][14]より筆者作成

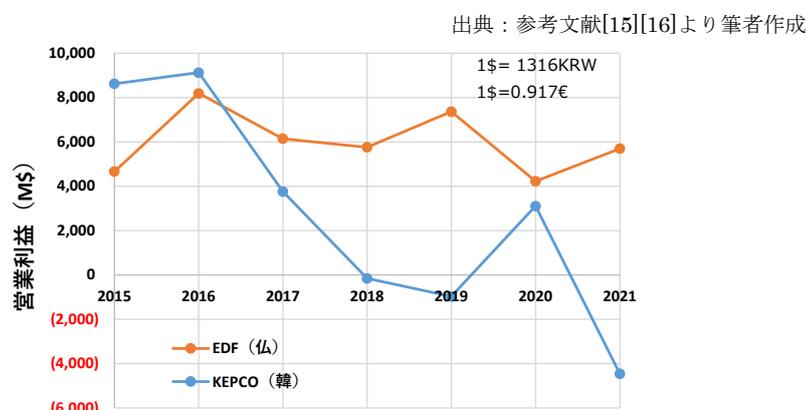


図 12 韓国 KEPCO と仏 EDF の業績の比較

また、図 13 に韓国とフランスの新規建設の成否状況を示す。巨大で複雑な原発建設を長年経験せず、新規建設に再挑戦する機会を海外に求めるのは厳禁である。(仏の例)。韓国の例より、まずは慣れた自国内で英知を結集して業界の能力を高めた上で建設プロジェクトを完遂し、経験を積んだ後に海外への再挑戦することが適切である。

出典：参考文献[24]より筆者作成

		2000年代	2010年代	2020年代
韓国	国内	継続して建設し、2000年以降10基運用で、現在も3基建設中。		
	海外	韓国初の輸出案件(UAE)にて、ほぼオンスケオンバジで3基運用し、現在も最後の1基建設中。		
フランス	国内	フランスで約10年ぶりとなる新規建設(フラマンビル3号)は、建設から16年経った現在も完成せず。		
	海外	フィンランドでの久々の新規建設(オルキオト3号)は、建設から18年経った現在も完成せず。		
		中国で新規建設2基は、計画通り2018年と19年に運用。		英国で1基建設中。
米国	国内	米国で30年ぶりとなる新規建設で、4基着工したが2基はコストオーバーランで建設中止。1基は計画から大幅遅延で2023年に運用。残り1基は建設中。ウェスティングハウス破綻の要因。		
	海外	中国での新規建設4基は、4基とも運転開始		

図 13 韓国、フランス、米国の原発新設プロジェクトの比較

6.3 サブ仮説③の検証

6.3.1 段階的統合のモデル

参考文献[23]で提唱されているコールドスタート理論を参考に原発業界が段階的に統合していくイメージを検討した結果を図 14 および図 15 に示す。

出典：参考文献[23]より筆者作成

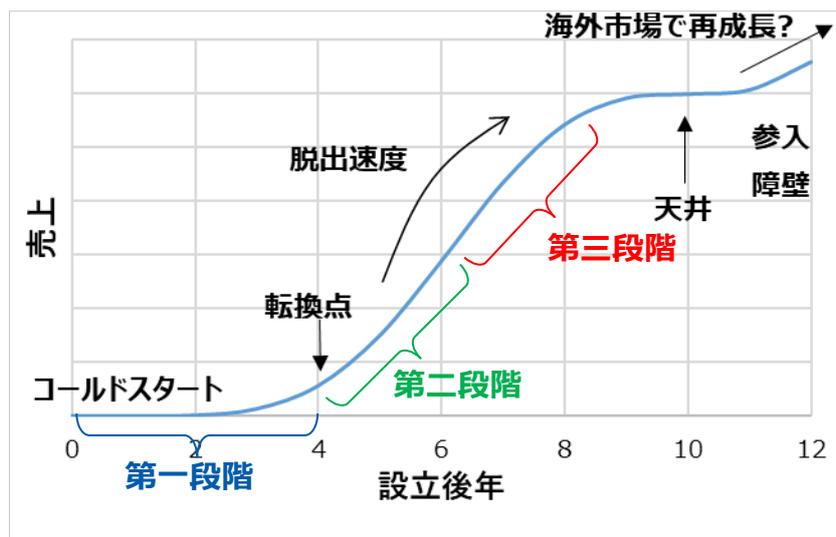


図 14 原発 PF の成長曲線イメージ

出典：筆者作成

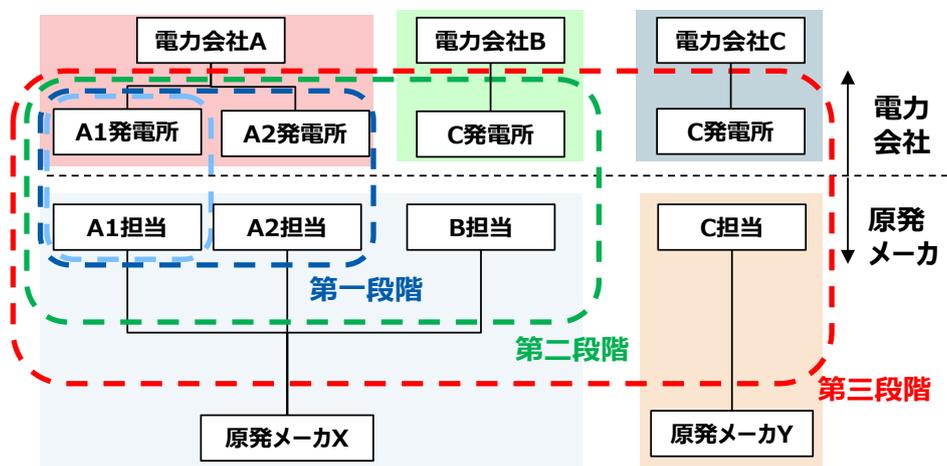
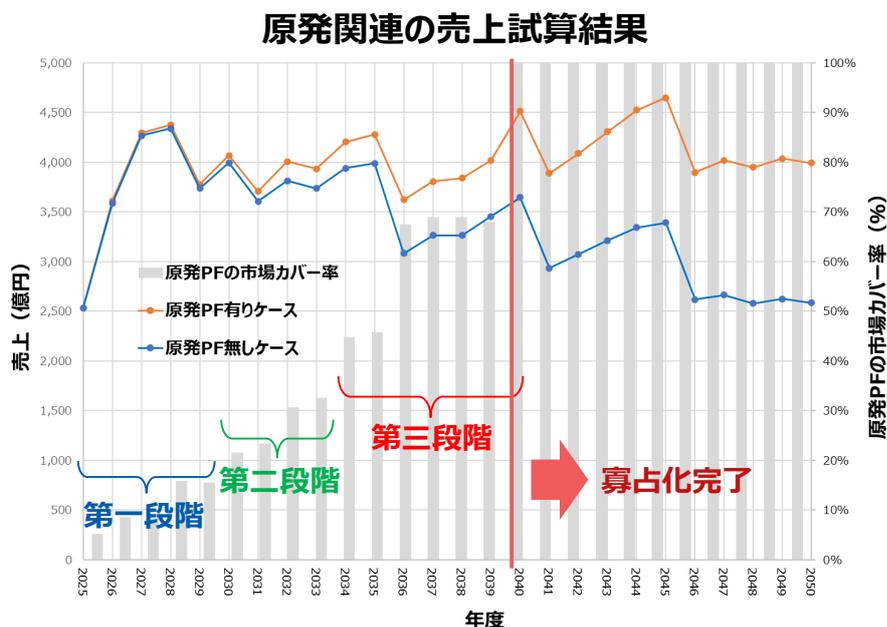


図 15 原発 PF の段階的成長

6.3.2 段階的統合を踏まえた原発プラットフォームの定量価値評価

本原発 PF の価値を、実際の国内原発市場を想定して試算した。その結果の代表例として原発業界全体での売上試算結果を図 16 に示す。国内すべてが統合した際には約 4,000 億円/年程度となった。売上・利益ともにプラットフォーム化しなかった場合に比べ 1.5 倍程度になると推測される。

出典：筆者作成



(a) 試算のベース条件

項目	値
出力	130万kW
売電単価	13円/kWh
稼働率	70%
所内率	4%
建設費	6500億円
安全対策費用	1400億円
保全費用	1.6円/kWh
建設・保全費用の機電分割	50%
新規建設ペース	2基/10年

(b) 原発 PF でのシナジーの想定

分類	効果	値
運転	出力向上	0.5%
	効率向上	0.5%
	稼働率向上	3.0%
	所内率改善	1.0%
	設計効率化	5.0%
建設	製造外注効率化	5.0%
	設計効率化	5.0%
	追加建設	1基
安全対策工事	設計効率化	5.0%
	製造外注効率化	5.0%

図 16 原発業界全体での売上の試算結果

第 7 章 検証を踏まえての考察

7.1 小型モジュール炉 (SMR) の開発ブームの影響

世界では小型モジュール炉 (以下、SMR) の開発がブームとなっている。小型で初期建設費抑制がウリであるが、発電単価(円/kWh)が高いのがネックである^[17]。実際に最有力であった NuScale 社の SMR は、26 年に初号機運開予定であったが、23 年 11 月に建設費高騰で建設計画が中止となった^[18]。そもそも日本は国土が狭く、量産化が見込めないことから SMR は日本市場には相性が悪い。部品供給メーカーとしての早期参加も考えられるが、SMR メーカーには新興が多く、開発参加には出資もセットで求められリスクが高い。このため SMR ブームに対しては静観が得策である。

7.2 国の GX 関連政策の原発プラットフォーム構想への影響

国策の中で原発に関連しうる「GX 経済移行債」、「長期脱炭素電源オークション」「カーボンプライシング」について、原発 PF への影響を考察した結果を表 3 に示す^{[2][19][20]}。特に「長期脱炭素電源オークション」は、初期投資額が大きい原発において期待が大きい。

表 3 国の原発関連政策の原発 PF への影響

政策	概要	原発PFへの影響
GX移行債	✓ 2050年CN達成に向け今後10年間で150兆円超の官民投資に対し、20兆円規模の「GX経済移行債」を発行。	原発関連は研究費確保の要素が強く、原発によるGXには大きな効果は無しと考えられる。
長期脱炭素オークション	✓ 発電事業者に初期投資額を含む固定費の回収の予見可能性を確保するため、脱炭素電源に対して固定費水準の容量収入を原則20年間提供する。	オークション額の上限は10万円/kW/年。仮に上限額で100万kWの原発を建設を想定した場合、最大で1,000億円/年の固定費分、20年間で2兆円の提供が可能。新規建設・大規模改善工事を促す。
カーボンプライシング	✓ 排出権取引（ETS）やCO2の削減を「価値」と見なして証書化し、売買取引をおこなう「クレジット取引」が開始。 ✓ 欧州のETSでは、現在でも約100兆円規模の取引。	現在、原発は本制度の対象外。しかし今後、原発が対象となれば、100万kW分のCO2の削減価値は49~97億円/年と試算。売電以外の大きな収益源となるポテンシャルあり。

出典：参考文献^{[2][19][20]}より筆者作成

第 8 章 まとめと今後の課題

8.1 まとめ

国は脱炭素社会の実現やエネルギー安全保障のために原発利用推進を掲げるが、原発業界は人材不足及び技術力低下の課題に直面している。この解決には、多数の企業からなるサプライチェーン構造（電力会社 11 社、原発メーカ 3 社、製造ベンダー数百社）と日々の発電、保全、設計等の活動を通して大量に生成されるデータの利活用に着目し、「電力会社、原発メーカ、製造ベンダーをプラットフォーム（PF）で繋ぐ業界構造への転換が必要」との仮説を立てた。これを「データを活用できる業界構造への転換」、「業界の寡占化」、「段階的再編」の 3 つのサブ仮説に分解した上で、自身の長年の原発技術者としての経験に加え、専門家へのヒヤリングや MOT 的フレームワークにより検証。原発内の「もの」から得られるデータで企業間をつなぐ IoT 型 B2B プラットフォーマーへの業界再編の有効性を示した。これを成功させるには、データを活用したビジネスが可能な業界構造となるよう、小規模な統合から段階的に寡占化していく業界構造転換が必要であり、その条件は以下であると整理した。

- ✓ 原発メーカのソフト(設計部門)と電力会社のソフト（保守部門）を統合した原発 PF 企業を設立し、データサービスを実用化。
- ✓ データサービスに載せた「モジュラー領域」製品で利益を創出し、原発人材・特有技術が必要な「すり合わせ領域」製品に投資。
- ✓ 業界特性を踏まえてデータをオープン/クローズに区分け。
- ✓ 電力会社と原発メーカを統合・寡占化した原発 PF 企業によりイノベーションを促進。
- ✓ 1 電力会社+1 原発メーカの小規模な垂直統合から始め、段階的に寡占化。

これまでの PF は GAFAM などの B2C が主であったが、これとは異なる IoT 型 B2B PF として原発業界に適用する考えは、これまでになかった発想である。

8.2 今後の課題

業界が寡占化に向かうプロセスにおいて、国の一定程度の関与が必要と考察しているが、具体的な関与の方法や程度については研究しきれていないため、今後の課題とする。

参考文献

- [1] [第6次エネルギー基本計画](#), 経済産業省 資源エネルギー庁, 令和3年10月
- [2] [GX実現に向けた基本方針](#), 経済産業省, 2023年2月10日
- [3] [原子力分野の人材育成を進めるために](#), 資源エネルギー庁, 2018年10月4日
- [4] [革新炉ワーキンググループ](#), 総合資源エネルギー調査会電力・ガス事業分科会 原子力小委員会
- [5] [原子力政策の課題と対応について](#), 資源エネルギー庁, 令和3年2月25日
- [6] [データ連携について](#), 経済産業省, 2022年7月7日
- [7] [Catena-X ホームページ](#)
- [8] [最先端デジタル技術を活用したシステムの全火力発電所への導入完了について～高度な設備監視サービスの事業化を目指す～](#), 東北電力
- [9] [IoT・AI技術を活用した火力発電所の運用高度化について](#), 北海道電力
- [10] [Society5.0の実現に向けた原子力デジタル産業基盤の構想](#), Society5.0の実現に向けた原子力デジタル産業基盤の構想, 三菱総合研究所, 2022年3月31日
- [11] [TOSHIBA SPINEX for Energy](#), (株)東芝
- [12] [経営重心](#), 若林秀樹, 幻冬舎
- [13] [アレバの経営危機を背景とした仏原子力産業の再編が完了](#), 電気事業連合会
- [14] [韓国の原子力](#), JAIF, 2018年8月
- [15] [EDF Financial Results](#)
- [16] [KEPCO Investor Relations](#)
- [17] [世界の小型モジュール炉の開発動向](#)
- [18] [「米国初」小型原発、建設計画を中止 インフレ直撃](#), 日本経済新聞
- [19] [J-クレジット制度概要](#), 日本取引所グループ
- [20] [長期脱炭素電源オークションについて](#), 経済産業省
- [21] [原子力政策の状況について](#), 資源エネルギー庁
- [22] [プラットフォーム革命](#), アレックス・モサド, ニコラス・L・ジョンソン, 英治出版
- [23] [ネットワーク・エフェクト](#), アンドリュー・チェン, 日経BP
- [24] [Reactor Database](#), World Nuclear Association