



# THE ROLE OF FAST REACTORS AS A SOLUTION FOR CLIMATE CHANGE AND NUCLEAR WASTE IMPLICATIONS

核廃棄物及び気候変動対策における高速炉の役割とその含意

Allison Macfarlane

March 10, 2023

US-Japan Nuclear Energy  
Cooperation on Fast Reactors

アリソン・マクファーレン  
「日米による高速炉開発を問う」

# WHY CONSIDER NUCLEAR POWER FOR CLIMATE CHANGE?

なぜ原子力が気候変動対策になると考えられているのか？

We're in an energy transition and we desperately need carbon-free energy resources

Provides an alternative to fossil sources and renewables

- Diversity of supply important

But is it a near-term (or mid-term) solution?

私たちはエネルギー転換期にあり、温室効果ガスを排出しないエネルギー源が切実に求められている

化石資源と再生エネルギーの代替を提供

- エネルギー供給源の多様化が重要

しかし原子力は短期的（あるいは中期的）な対策になりえるのか？

# ECONOMICS CHALLENGES: CAPITAL COSTS

## 経済的課題：資本コスト

But what about factory built modules? That will solve the cost problem.  
Will it?

工場でモジュール（部材）生産して現地で組み立てるモジュール工法  
ではどうか？それによりコスト問題は解決されるだろう。  
そうだろうか？

Vogtle, Georgia

ボーグル原発、ジョージア州



VC Summer, South Carolina

VCサマー原発、サウスカロライナ州



Abandoned, July 31, 2017 2017年7月31日 建設中止

# MODULAR FABRICATION EXPERIENCE IN US

## 米国におけるモジュール炉建設の経験



**Welding and Rewelding at Vogtle**  
ボーグル原発での溶接、再溶接

**Westinghouse bankruptcy, March 2017**  
ウェスティングハウスの経営破綻、2017年3月



**Shaw Modular  
Solutions  
Plant, Lake Charles,  
LA**

ショー・モジュラー・  
ソリューション工場、  
レイクチャールズ、  
ルイジアナ州



# ECONOMICS CHALLENGES: MEGAPROJECTS

## 経済的課題：巨大プロジェクト

Majority of these reactors exist on paper only – no demonstration models yet

これら原子炉の大半は紙の上だけの存在 — 実証モデルは未だない

Engineering model: design – build prototype – redesign – build full-scale model – redesign – deploy = high costs

construction of these megaprojects is challenging – whether factory-produced or not – procurement and project management issues (costly and time-consuming)

工学モデル：設計–原型モデルの建設–再設計–本格モデルの建設–再設計–市場展開＝高コスト

こうした巨大プロジェクト建設は、モジュールを工場生産しようとしまいと、部材の調達やプロジェクトの管理が難しい（費用と時間がかかる）

# ECONOMICS CHALLENGES: OTHER COSTS

## 経済的課題：その他のコスト

Utilities want energy technologies that can do load-following. Nuclear can do this by adding energy storage – at a cost.

Most fast reactors plan to use HALEU (high assay low enriched uranium) – need additional security and safeguards = more costs

For reactors that reprocess their spent fuel – need additional security and safeguards = more costs

For those plants whose spent fuel is not stable for repository disposal there will be additional processing costs

電気事業者は負荷追従運転\*が可能なエネルギー技術を好む。エネルギー貯蔵設備があれば原子力でも可能 —費用がかかる \*記者注：出力調整運転

高速炉の殆どがHALEU（高純度低濃縮ウラン）の使用を計画—セキュリティと保障措置の強化が必要 =コスト増大

使用済燃料を再処理する場合—セキュリティと保障措置の強化が必要 =コスト増大

使用済燃料が不安定で直接処分できない場合、前処理に追加コストがかかる

# WHY THINK ABOUT THE NUCLEAR WASTE?

## なぜ核廃棄物について考えるのか？

Direct and significant implications for:

- Cost
- Security
- Proliferation/Safeguards
- Public Acceptance

直接的かつ重大な影響を及ぼす

- コスト
- セキュリティ
- 核拡散 / 保障措置
- 社会的受容

Like Security by Design and Safeguards by Design

- Better to consider during reactor R&D than as an add-on later

「セキュリティ・バイ・デザイン」「セーフガード・バイ・デザイン」\*と同様

- あとからアドオン（追加）するよりも、原子炉のR&D（研究及び開発）段階で検討する方が望ましい



\*訳者注：セキュリティ対策や保障措置を設計段階から組み入れる

# NUCLEAR WASTE ISSUES

## 核廃棄物問題

For all reactors:

Spent Fuel Storage/Transportation

Processing/Reprocessing?

- Extra processes needed?

High level waste Disposal

Low and intermediate level waste disposal

Security, safeguards, safety

すべての原子炉において：

使用済燃料の貯蔵／輸送

処理／再処理？

- 追加処理が必要？

高レベル廃棄物の処分

低・中レベル廃棄物の処分

セキュリティ、保障措置、安全性

What's different with fast reactors?

- Chemically exotic fuels
  - Metallic Na, Metallic U,  $UF_4$
- Exotic coolant - sodium
- Use of reflectors, shields, due to smaller reactor size
- Waste streams from processing

高速炉は何が特殊なのか？

- 化学的に特異な燃料
- 金属ナトリウム、金属ウラン、四フッ化ウラン
- 特殊な冷却材—ナトリウム
- 原子炉が小型であるために用いられる反射体や遮蔽体
- 処理によって生じる廃棄物の流れ

# NEUTRON LEAKAGE FROM SMALL MODULAR REACTORS

## 小型モジュール炉からの中性子漏洩

Neutron leakage from small reactors has implications for waste management

Generally, for a smaller reactor, there will be more leakage

Can reduce leakage with use of reflectors, increasing enrichments, changing moderator, and playing with batch loading and burnup

Bottom line: Due to neutron leakage, Small modular reactors will generate more spent fuel and more LILW than large energy-equivalent PWRs

小型炉からの中性子漏洩は、廃棄物処理に影響を及ぼす

一般的に原子炉は小型になるほど漏洩が多くなる

反射体を使用したり、燃料の濃縮度を高くしたり、減速材を変えたり、燃料交換のバッチ数や燃焼度を調整することで漏洩は低減できる

結論：中性子漏洩のために、小型原子炉は、同じ出力規模の大型加圧水型原子炉（PWR）よりも、使用済燃料及びLILW（低レベル及び中レベル廃棄物）の発生量が多くなる

## References

### 参考文献

Brown, Worrall, Todosow, 2017, Annals of Nuclear Energy

Krall, Macfarlane, and Ewing, 2022, Proceedings of the National Academy of Science

# WASTE IMPLICATIONS FOR FAST REACTORS

## 高速炉の廃棄物がつ含意

### Sodium-Cooled fast reactors

- Sodium-bonded Uranium metal fuel will need processing prior to disposal
- Neutron reflectors and shielding – will be low and intermediate level waste
- Sodium coolant – will be contaminated by  $^{22}\text{Na}$  activation product and Cs isotopes from ruptured fuel elements
- Sodium-bonded fuels are pyrophoric, need to be processed into a stable waste form for disposal

### ナトリウム冷却高速炉

- ・ ナトリウムと結合したウラン金属燃料は廃棄処分の前に処理が必要
- ・ 中性子反射体および遮蔽体 — 低・中レベル廃棄物となる
- ・ ナトリウム冷却材 — 放射化生成物ナトリウム22と、破損燃料要素からのセシウム同位体で汚染される
- ・ ナトリウムと結合した燃料は自然発火性なので、廃棄処分の前に、状態を安定化させるための処理が必要

### Processing Implications

- Additional waste streams that require disposal
- Additional facilities that need licensing
- Additional supply chains that need to be established
- = Additional Costs

### 処理が意味するもの

- ・ 処分を必要とする廃棄物の流れが増える
- ・ 許可を必要とする施設が増える
- ・ 新たなサプライチェーンの構築が必要
- ＝コスト増大

# SECURITY/SAFEGUARDS ISSUES

## セキュリティ／保障措置問題

HALEU spent fuels may require special packaging for storage, transport, and disposal and may entail additional security/safeguards issues

Any processing or reprocessing that separates actinides will require both additional security and safeguards measures

HALEU（高純度低濃縮ウラン）の使用済燃料を貯蔵、輸送並びに処分するにあたっては特殊なパッケージと、セキュリティ／保障措置の強化が求められよう

アクチニド分離のための処理ないし再処理は、セキュリティと保障措置の両方の強化が必要となるだろう



# LOW IMPACT FOR CLIMATE CHANGE OVER NEXT FEW DECADES 今後20-30年の間、気候変動対策としての有効性は低い

Actual costs of reactors are unknowable at this time

- Cost of plant
- Cost of fuel
- Cost of waste, energy storage, etc

Length of build uncertain

Supply chain issues

Project management

It will take at least 10-20 years or longer to sort this out

**現時点では原子炉の実際のコストは不可知**

- 原子炉のコスト
- 燃料のコスト
- 廃棄物、エネルギー貯蔵等のコスト

**建設期間が不確か**

**サプライチェーン問題**

**プロジェクト管理これらの問題を解決するには、少なくとも10年から20年、あるいはそれ以上の時間を要する**

