GEN IV International Forum℠
Expertise | Collaboration | Excellence

鉛冷却高速炉（LFR）

概要 / 目的:

鉛冷却高速炉（LFR）の特徴は、高速炉中性子スペクトル、冷却剤の沸騰までの時間的余裕が長く、かつ空気または水との反応が比較的穏やかであり、これらを活用する設計的な特徴を備えていることです。他の高速炉と同様、LFRも資源の活用及び持続可能性を飛躍的に向上する燃料サイクルを可能にする選択肢の1つです。安全性、シンプルな設計、核拡散抵抗性、経済性において大きな可能性を持つLFR。本ウェビナーでは、高速炉物理特性、開発の歴史、現在検討中のLFR技術、概念設計の主な特徴を紹介します。

講演者紹介:

Craig Smith（クレイグ・スミス）教授は、米国カリフォルニア州モントレーにある海軍大学院の研究教授で、原子力エネルギー技術、放射線検出、情報科学の分野で幅広い経験を持つ原子力技術者です。前職では、ローレンス・リバモア国立研究所（LLNL）で核分裂エネルギー・システム安全プログラムの責任者を務めました。2004年からは、カリフォルニア州モントレーの海軍大学院（NPS）でLLNL議長教授を務めました。LLNLを退職後、NPSの物理学研究教授に就任。

Why LFR Technology?

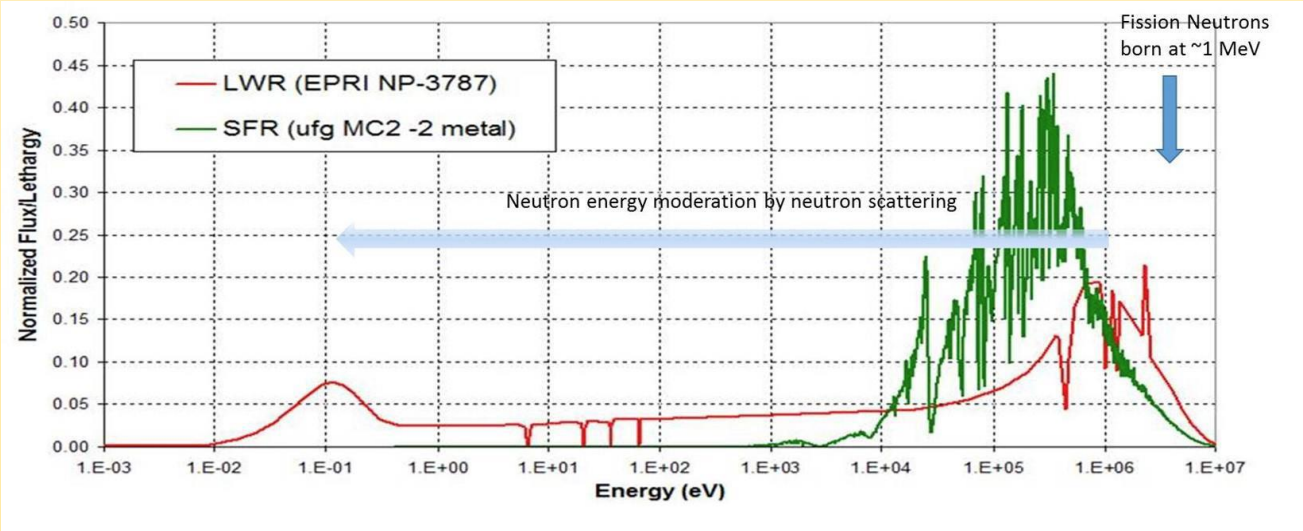
GEN IV International Forum℠

- As with other Fast Reactors, LFRs offer:
  - Significant advantage in sustainability/uranium utilization – better use of natural resources
  - Potential for dramatic reduction of high level waste if full recycle (closed fuel cycle) is used
- Relative to other fast reactors, LFRs have a unique combination of favorable features:
  - Very high boiling point (1737°C)
  - Benign chemistry (no rapid chemical reaction with water/air)
  - Low vapor pressure
  - Excellent neutronic properties for fast spectrum operation
- These features are inherent in the properties of the lead coolant and can be exploited through proper plant design.

9

1. 高速炉物理学の要約：高速（SFR）スペクトルと熱（LWR）スペクトルの比較

- 軽水炉のような熱中性子炉では、ほとんどの核分裂は~0.1eVの「熱」ピーク付近で発生する。
- LFRやSFRのような高速炉では、中性子エネルギーの減速が回避され、核分裂は主に「高速」エネルギー領域で発生する。



2. 液体金属冷却剤の化学的および熱的特性

- いずれの鉛系冷却材も、水や空気との化学反応性がほとんどないため、LFRの設計・安全性・経済性に大きな影響を与えます。

Coolant	Melting Point (°C)	Boiling Point (°C)	Chemical Reactivity (w/Air and Water)
Lead-Bismuth (Pb-Bi, LBE)	125	1670	Practically Inert
Lead (Pb)	327	1737	Practically Inert
Sodium (Na)	98	883	Highly reactive

3. 異なる原子炉冷却材の蓄積ポテンシャルエネルギー

- 鉛冷却高速炉冷却材の蓄積エネルギーの量が非常に低いことは、冷却材の固有の特性に基づいて安全性が向上していることを示している。

Coolant	Water	Sodium	Lead, LBE
Parameters	P = 16 MPa T = 300 ºC	T = 500 ºC	T = 500 ºC
Maximal potential energy, GJ/m^3, *including:*	~ 21.9	~ 10	~ 1.09
Thermal energy / *including* compression potential energy	~ 0.90 / ~ 0.15	~ 0.6 / None	~ 1.09 / None
Potential chemical energy of interaction	With zirconium ~ 11.4	With water 5.1 With air 9.3	~0
Potential chemical energy of interaction of released hydrogen with air	~ 9.6	~ 4.3	None

4. 第四世代炉リファレンスLFRコンセプトの設計パラメータの要約

LFRのSRPでは、ELFR（大型）, BREST-OD-300（建設中）, SSTAR（可搬型、小型で超臨界二酸化炭素ガスタービンサイクルを二次サイクルに採用）などのリファレンスシステムが採用されている。

Parameter	ELFR	BREST-OD-300	SSTAR
Core power (MW_{th})	1500	700	45
Electrical power (MW_e)	600	300	20
Primary system type	Pool	Pool/loop	Pool
Core inlet T (°C)	400	420	420
Core outlet T (°C)	480	535	567
Secondary cycle	Superheated steam	Superheated steam	S-CO_2
Net efficiency (%)	42	43.5	44

5. 鉛冷却高速炉は安全性に優れている可能性を有する

この部分の議論をまとめると、鉛冷却高速炉は、このスライドで説明している理由（高融点、水や空気と急激に化学的活性ではないこと、十分な熱容量など）から、安全性に優れている可能性がある。

LFRs Have the Potential to Excel in Safety

GEN IV International Forum℠

- The very high boiling point of lead (~1737°C):
  - Allows reactor operation at near atmospheric pressure
  - Eliminates the risk of core voiding due to coolant boiling
- No rapid chemical reactions between lead and either water or air
  - No energetic releases or hydrogen production from chemical reactions
  - Use of water as ultimate heat removal fluid is conceivable, should other heat removal systems fail
- The thermal capacity of lead combined with the large mass of coolant
  - Significant thermal inertia in the event of hypothetical accident initiators.
  - Long grace time (the need for operator's intervention is eliminated or significantly delayed)
- Lead shields gamma radiation and retains iodine and cesium up to 600°C
  - Reduced source term in case of fuel rod failure → enhanced Defense-in-Depth.
- The low neutron moderation of lead allows greater fuel spacing without excessively penalizing neutronic performance:
  - Reduced risk of flow blockage
  - Reduced core pressure drop and simple coolant flow path allow decay heat to be removed through natural circulation

13

6. 課題があるが、第一に腐食性があり、これが最も注目されている。考慮する必要がある他の課題としては、鉛の融点や凝固点が327℃と高いことが挙げられる。もう一つの課題は、冷却水の密度と重量が高いため、耐震性や構造上の配慮が必要なことである。

However, There are Challenges to Address

GEN IV International Forum℠

- **Corrosion potential**
  - Operate at temperatures low enough to avoid corrosion (current materials can be used)
  - Use advanced materials for higher temperature operation, to enhance economics
    - Silicon or Aluminum enhanced materials (i.e., Alumina Forming Austenitic (AFA) steels and Silicon enhanced steels)
    - Surface coating with corrosion-protective materials for higher temperature operation (cladding + steam generator)
    - Functionally graded composite materials
  - In any case, methods must be implemented to monitor/control oxygen content to maintain protective oxide coatings and avoid the formation of PbO
- **High melting point (327◦C)**
  - Proper engineering to avoid lead freezing
- **Seismic/structural considerations due to heavy coolant**
  - Compact size mitigates this challenge
  - Seismic isolation
- **Opaque, high-temperature coolant**
  - Similar in service inspection issues and solutions as for SFR
  - Accessibility/replaceability of components
  - Newer acoustic methods

These challenges are generally technical in nature and can be overcome through proper engineering and R&D work

10