

核燃料(研究開発)の今後の展望

京都大学 複合原子力科学研究所

黒崎 健

2021年 第5回 核燃料・材料・水化学 夏期セミナー

2021年8月10日～11日
オンライン開催

共通テーマ 「1F後10年」

- 1Fが核燃料研究に与えた影響を考察
- 1F前と後の研究動向をレビュー
- 今後の展望を言及

1F前 「原子カルネッサンス」#1

- 軽水炉燃料
 - 高燃焼度化
 - 軽水炉MOX燃料の照射挙動
 - 燃料ペレット(大粒径ペレット、エルビア添加燃料・・・)
 - 燃料被覆管(Zr-Nb合金・・・)

1F前 「原子カルネッサンス」#2

- 高速炉燃料
 - FS、FaCT
 - 主概念: MOX燃料+先進湿式法+簡素化ペレット法
 - 副概念: 金属燃料+乾式法+射出鑄造法
 - 窒化物燃料
 - MA含有燃料
 - 燃料被覆管開発(ステンレス鋼、ODS鋼・・・)

1F事故と核燃料

- ジルコニウム合金のジルコニウム-水反応
- 炉心溶融から燃料デブリ生成

1F後 これまでの10年 #1

- ATF
 - 燃料ペレット(クロミア添加燃料・ADOPT燃料^(注)、シリサイド燃料・・・)
 - 燃料被覆管(コーティングジルカロイ、鉄基合金、SiC・・・)
 - 米国で照射試験推進

^(注)クロミア添加の効果としては、大粒径化(FPガス放出抑制)や粘塑性向上(PCMI抑制)などが言われている。1F後のATFという概念以前から類似の研究例は多数存在する(アルミナシリケート添加大粒径ペレットなど)。

1F後 これまでの10年 #2

- 燃料デブリ(特に1F関係)
 - FP挙動(これまでは固体状FPの蓄積が燃料物性に及ぼす影響の評価、現在は、揮発性FPの挙動評価)
 - 新しい化学種(ホウ化物、鉄-Zr金属間化合物、(U,Zr)O₂・・・)

1F後 現在

- 原子カイノベーション
- NEXIP (Nuclear Energy × Innovation Promotion)
 - 経産省(民間企業等) × 文科省(大学・研究機関等)
 - 安全性向上・社会的受容対応

例 様々な炉型の提案(SMR、ガス炉、熔融塩炉、軽水炉、高速炉・・・)
それぞれの炉型に最適な燃料開発の需要は高い

(化学形態) 酸化物、金属、窒化物、熔融塩・・・

(形状) ペレット、スラグ、粒子、被覆粒子、融体・・・

(製造方法) 粉末冶金、射出鋳造、ゾル・ゲル・・・

1F後 今後の展望 #1

伝統・堅実 + 革新・チャレンジ → 夢・希望

↑
これまで

↑
今後

↑
明るい未来

1F後 今後の展望 #2

- 研究: 異分野・最先端
- 人材: 若手・継承
- 施設: 共有・更新

1F後 今後の展望 #3

- 研究の動向
 - 少し前
 - 計算科学の適用
 - 核燃料、特殊な物質、計算科学との親和性大
 - 分子動力学法
 - 化学平衡計算
 - 第一原理計算
 - 有限要素解析

1F後 今後の展望 #4

- 研究の動向
 - 現在
 - 材料科学 × 情報科学 = マテリアルズ・インフォマティクス
 - 高熱伝導率ウラン化合物の提案
 - XRDパターンからの機械的特性評価
 - 燃料デブリ性状評価

1F後 今後の展望 #5

- 高熱伝導率ウラン化合物の提案 [1]
 - 化学組成をより基礎的な情報に分割したものを入力として、出力を熱伝導率とする機械学習モデルを構築
 - Materials Projectに格納されている全951種類のウラン化合物について、その熱伝導率を網羅的に評価
 - 熱伝導率が最も高いものから最も低いものまで、951のウラン化合物に順番を付与

1. UBe_{13}	947. RbUTe_3Au
2. UH_3	948. $\text{Sr}_3\text{U}_{11}\text{O}_{36}$
3. UB_2Ru_3	949. $\text{U}(\text{PbO}_2)_3$
4. $\text{U}_6\text{Fe}_{16}\text{Si}_7$	950. $\text{Sr}_3\text{U}(\text{Te}_2\text{O}_7)_2$
5. UCo_3B_2	951. BaUTe_4

[1] 日本原子力学会2021年秋の大会にて発表予定

1F後 今後の展望 #6

- 次に来るのはなにか？ 他分野の動向を見ると、、、
- 文科省R3年度戦略目標 [2]

グリーン社会の実現（脱炭素社会・循環経済への対応）

1. 資源循環の実現に向けた結合・分解の精密制御（JST）
2. 複雑な輸送・移動現象の統合的理解と予測・制御の高度化（JST）

デジタル社会の形成（DXによるイノベーション推進）

3. Society 5.0時代の安心・安全・信頼を支える基盤ソフトウェア技術（JST）
4. 『バイオDX』による科学的発見の追究（JST）
5. 元素戦略を基軸とした未踏の多元素・複合・準安定物質探査空間の開拓（JST）

コロナ後の新たな社会の創造（JST/AMEDの連携強化）

6. 感染症創薬科学の新潮流（AMED）
7. 「総合知」で築くポストコロナ社会の技術基盤（JST）
8. ヒトのマルチセンシングネットワークの統合的理解と制御機構の解明（JST・AMED共通の目標として一体的に推進）



[2] https://www.mext.go.jp/content/20210312-mxt_kiso-000013144_1.pdf

1F後 今後の展望 #7

- DX(デジタル・トランスフォーメーション)
- アナログ → デジタル = イノベーション
- 原子力・核燃料の多くはアナログ社会、DXの可能性は大きい
- 核燃料分野におけるDXの例
 - プロセス・インフォマティクスによる燃料製造条件最適化
 - データ・インテグレーションとマテリアルズ・インフォマティクスの融合によるジルコニウム合金組成最適化

まとめ

- 1F事故 → 新しい研究(ATF、燃料デブリ・・・)
 - $(U,Pu)O_2 \rightarrow (U,Zr)O_2$
 - SMFUEL → SIMDEBRI
- 原子力イノベーション、NEXIP → 異分野×最先端
 - 伝統・堅実 + 革新・チャレンジ → 夢・希望
 - 計算科学からマテリアルズ・インフォマティクスへ
- 次に来るものは？
 - 他分野の動向 → DX(デジタル・トランスフォーメーション)
- これからの核燃料(原子力)分野に必要なものは？
 - 若くて優秀な人材
 - 答えのない問い + 文理統合 + 重要 + 国際