



Japan Atomic Energy Agency

燃料デブリ臨界管理のための 臨界リスク基礎データの整備・拡充

日本原子力研究開発機構

安全研究・防災支援部門

安全研究センター

燃料サイクル研究ディビジョン

臨界安全研究グループ

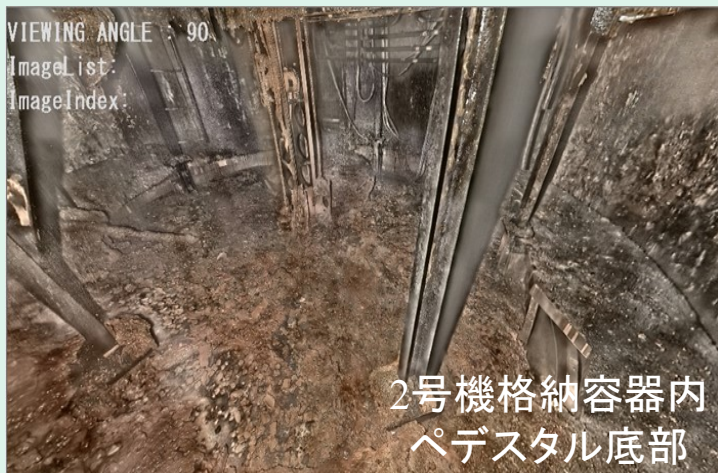
荒木祥平

令和二年度 安全研センター報告会

令和2年11月27日

本発表の一部は原子力規制庁からの受託事業
「平成27～30年度東京電力福島第一原子力発電所燃料デブリの臨界評価手法の整備」の成果である

背景 | 福島第一原子力発電所燃料デブリ取出しと臨界管理



2号機格納容器内
ペDESTAL底部

出典: 東京電力ホールディングス
(http://photo.tepco.co.jp/ext_lib/180426_01/180426_08.jpg)

燃料デブリ

➡局所的に多様な性状を持つ

- 取出し作業
- 収納・輸送・保管

性状の不確かさを考慮した
慎重な**臨界管理が必要**

●当初のアプローチ:

決定論的な考え方による評価・管理*

- 核的制限値の設定に必要な多数のサーベイ計算を実施

バウンダリーの確保が困難で核的制限値の設定が難しい

背景 | 福島第一原子力発電所燃料デブリ取出しと臨界管理

●現在のアプローチ:

リスクの考え方を取り入れた評価・管理

➡不確かさを考慮して、臨界となる条件と確率及びその影響を評価



燃料デブリの性状を踏まえた臨界条件及び
燃料デブリが臨界を超過した際の臨界挙動を
評価する手法を新たに整備

臨界リスク基礎
データの整備・拡充

新しい解析コードの開発
(Solomonの開発)

臨界実験による
解析コードの妥当性評価

臨界挙動評価
手法の整備

背景 | 臨界リスク基礎データの整備・拡充

リスクの考え方を取り入れた評価・管理を行うためには
 臨界となる条件を評価するための**基礎データが必要**

基礎データの整備・拡充

- 現実的なデブリ組成の評価
 - **多数の**組成モデルの作成
 - 燃料組成（濃縮度、燃焼度）
 - 燃料装荷パターン, etc.
- **多数の**組成モデルについて臨界特性解析を実施



多数の解析作業の管理のための、データベースシステムを開発

- データベースを活用した解析の実施・結果の整理
- データベースを活用した解析結果の解釈・知見を得る

本発表の目的

- 多数の解析作業の管理のため開発した
臨界基礎データベースの紹介
- データベースシステムを用いた
解析によって得られた新たな知見の紹介

本発表の目的

- 多数の解析作業の管理のため開発した
臨界基礎データベースの紹介
- データベースシステムを用いた
臨界特性解析によって得られた知見の紹介

臨界リスク基礎データベース

臨界リスク基礎データ

デブリの性状

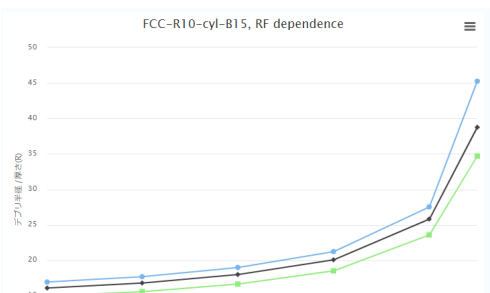
- 燃料組成
- 混合物 (鉄、コンクリート)
 - 含有率
- 中性子減速条件
 - 減速材量(水分量)
- 計算体系
- etc.

増倍率解析

計算条件

- 計算コード
- 核データ

臨界特性データ



使用者が見やすい形で整理

臨界特性解析

- 無限増倍率 k_{∞}
(臨界になり得るかどうか)
- 実効増倍率 k_{eff}
(有限体系での増倍率)

データ
処理

どの程度で臨界となるか

- 臨界半径
- 臨界質量
- etc.

パラメータで
整理

臨界リスク基礎データベース

臨界リスク基礎データ

デブリの性状

- 燃料組成
- 混合物 (鉄、コンクリート)
 - 含有率
- 中性子減速条件

増倍率解析

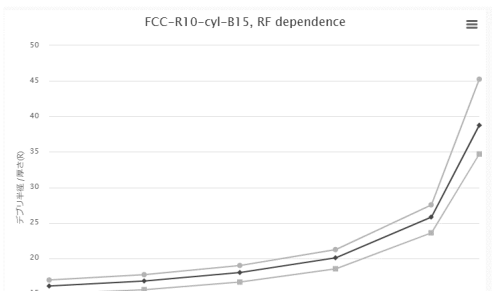
計算条件

臨界特性解析

- 無限増倍率 k_{∞}
(臨界になり得るかどうか)
- 実効増倍率 k_{eff}
(有限体系での増倍率)

- 一連の情報をデータベースとして保存
- 各操作を行うWebアプリケーションを整備

臨界特性データ



使用者が見やすい形で整理

どの程度で臨界となるか

- 臨界半径
- 臨界質量
- etc.

パラメータで整理

臨界リスク基礎データベース

臨界リスク基礎データ

デブリの性状

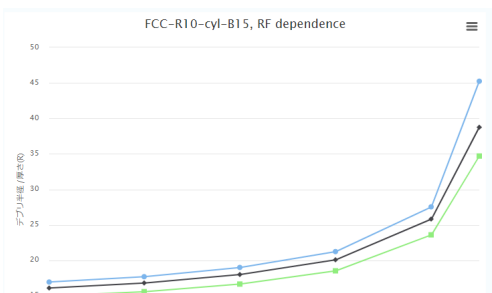
- 燃料組成
- 混合物 (鉄、コンクリート)
 - 含有率
- 中性子減速条件
 - 減速材量(水分量)
- 計算体系
- etc.

増倍率解析

計算条件

- 計算コード
- 核データ

臨界特性データ



使用者が見やすい形で整理

臨界特性解析

- 無限増倍率 k_{∞}
(臨界になり得るかどうか)
- 実効増倍率 k_{eff}
(有限体系での増倍率)

データ
処理

どの程度で臨界となるか

- 臨界半径
- 臨界質量
- etc.

パラメータで
整理

デブリ性状の入力例

利用したいデータ
(組成・体系)を自由に登録

増倍率解析時には
データを自由に選択可能

燃料組成データ(一例)

Radioisotope	Material	System	Description	
<input type="radio"/>	8	Spent Fuel 14GWd/t	UO2	H26年度原子力施設の臨界管理安全基盤強化委託費事業報告書を参考に入力
<input type="radio"/>	9	MCCI(UO2(5wt%) normal concrete)	MCCI	5wt%UO2燃料と一般コン
<input type="radio"/>	10	MCCI(UO2 normal concrete)	MC	
<input type="radio"/>	11	MCCI(Fresh+Concrete), Hetero		
<input type="radio"/>	12	Water(規制庁受託)	H2	

燃料デブリ臨界マップデータベースシステム

You have 11 waiting calcs. You have 1 finished calcs.

TOP 臨界計算管理システム 臨界マップ管理システム 臨界マップ表示システム araki Logout

Enter Parameters

Composition.MT

Variable

Variation

Composition.RF

Variation

変化させたいパラメータの
数値を任意に入力

増倍率解析処理

自動生成されるMVPの入力ファイル

```

*****
* Cross section or Material composition data
*****
% CTEMP = 273.15 + 25.00 /* Temperature (Kelvin)
% MT = 0.300000 /* Moderator Thickness (cm)
% RP = 1.000000 /* base Part
% VmVf = (1.0+MT/RP)**3-1.0 /*
% PF = 1.0/(VmVf+1.0) /*

$XSEC
TPRECS( 0.01 )
* ----- << FUEL >> -----

& IDMAT(1)
TEMPMT(<CTEMP>)
U02340J40( 3.782380E-06 )
U02350J40( 3.240230E-06 )
U02380J40( 1.601810E-06 )
PU2380J40( 1.479870E-06 )
PU2390J40( 8.430100E-06 )
PU2400J40( 2.625280E-06 )
PU2410J40( 1.050210E-06 )
PU2420J40( 3.737020E-06 )
    
```

解析コードの入力データが生成され、自動的に計算が実行される。

入力した
数値が反映

選択した材料
データが反映

Check	Id	Name	Status	Job No	Actions
	7,753	Core-Av-RF20-MT0030[0]	submitted		View Cancel
	7,752	Core-Av-RF20-MT0030[1]	submitted		View Cancel
	7,751	Core-Av-RF20-MT0030[2]	submitted		View Cancel
	7,750	Core-Av-RF20-MT0030[3]	submitted		View Cancel

Check	Id	Name	Status	Job No	Actions
	7,753	Core-Av-RF20-MT0030[0]	submitted		View Cancel
	7,752	Core-Av-RF20-MT0030[1]	submitted		View Cancel
	7,751	Core-Av-RF20-MT0030[2]	submitted		View Cancel
	7,750	Core-Av-RF20-MT0030[3]	running		View Cancel

Check	Id	Name	Status	Job No	Actions
	7,753	Core-Av-RF20-MT0030[0]	running		View Cancel
	7,752	Core-Av-RF20-MT0030[1]	submitted		View Cancel
	7,751	Core-Av-RF20-MT0030[2]	submitted		View Cancel
	7,750	Core-Av-RF20-MT0030[3]	finished		View Cancel Reap

発注

実行

完了

ユーザーは計算の実行状況が確認できる。

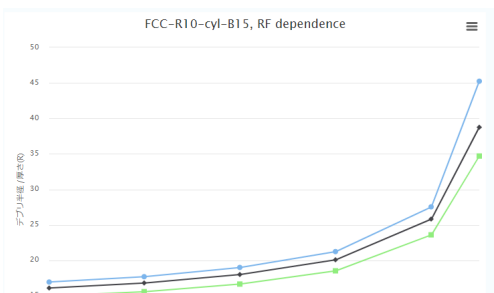
臨界リスク基礎データベース

臨界リスク基礎データ

デブリの性状

- 燃料組成
- 混合物 (鉄、コンクリート)
 - 含有率
- 中性子減速条件
 - 減速材量(水分量)
- 計算体系
- etc.

臨界特性データ



使用者が見やすい形で整理

増倍率解析

計算条件

- 計算コード
- 核データ

パラメータで整理

臨界特性解析

- 無限増倍率 k_{∞}
(臨界になり得るかどうか)
- 実効増倍率 k_{eff}
(有限体系での増倍率)

データ処理

どの程度で臨界となるか

- 臨界半径
- 臨界質量
- etc.

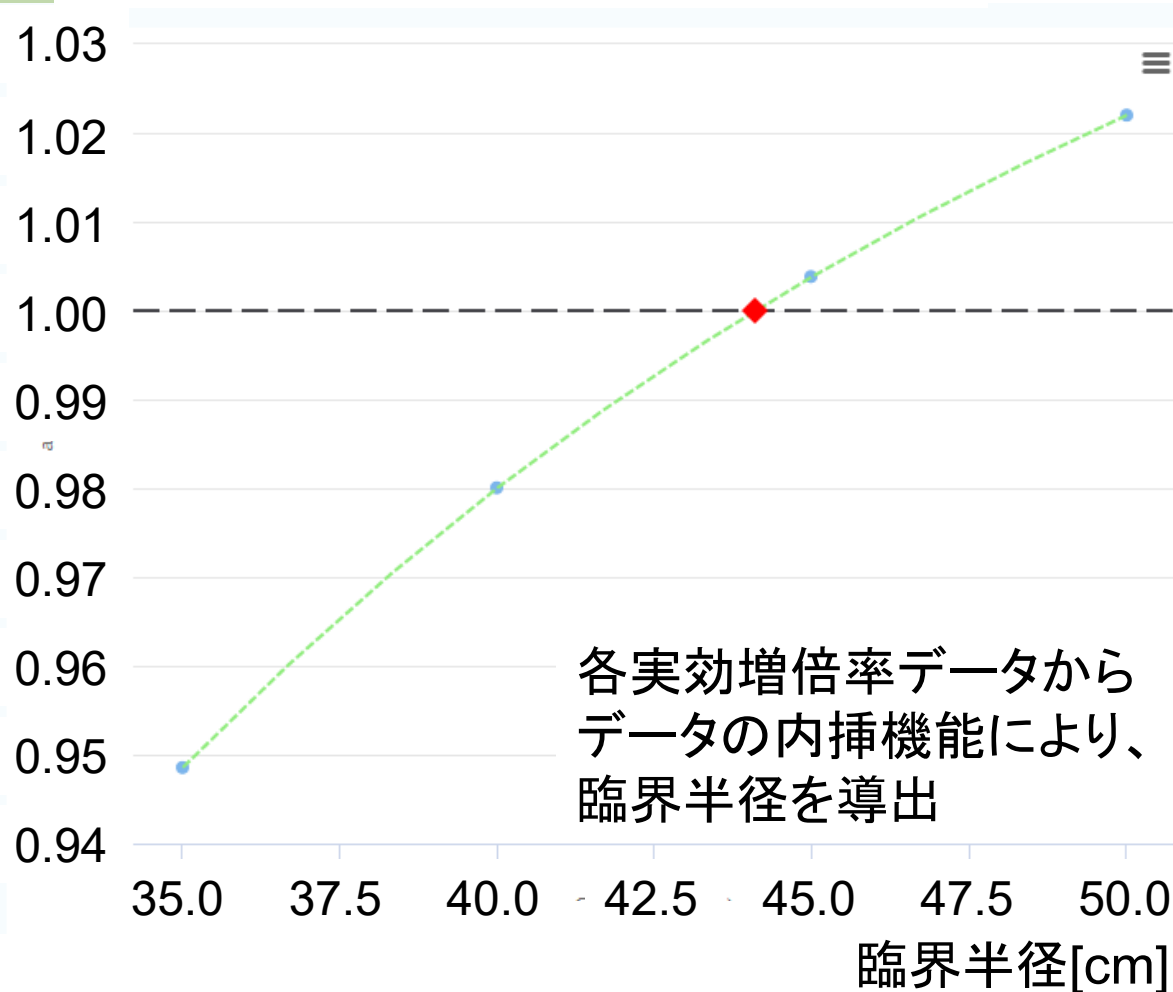
増倍率データ処理

Id	8608
Name	
input	1F1FMS-152BU64Bplus333B68B-RF30-MT0
Composition	1F-3 FSM,Hetero_FCC
Geometry	Sphere, Water reflector
Status	reaped
Comment	
User	
Created	2018/06/07 15:31
Modified	2018/06/25 13:39
Output File1	output1
Output File2	
Keff	1.017740
Keff Sigma	0.000200
NPART	6000000
NHIST	625
NSKIP	100
Random Seed	0
Start Date	2018/06/25 13:34
Finish Date	

解析コードの出力ファイルから自動的に増倍率データをデータベースに保存

実効増倍率

増倍率データ



臨界リスク基礎データベース

臨界リスク基礎データ

デブリの性状

- 燃料組成
- 混合物 (鉄、コンクリート)
 - 含有率
- 中性子減速条件
 - 減速材量(水分量)
- 計算体系
- etc.

増倍率解析

計算条件

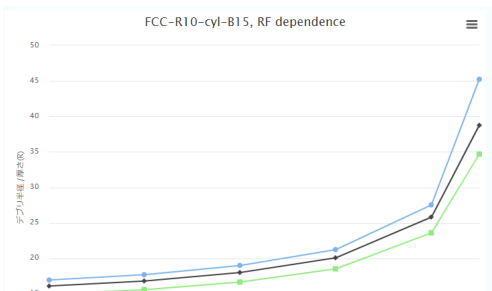
- 計算コード
- 核データ

臨界特性解析

- 無限増倍率 k_{∞}
(臨界になり得るかどうか)
- 実効増倍率 k_{eff}
(有限体系での増倍率)

データ
処理

臨界特性データ



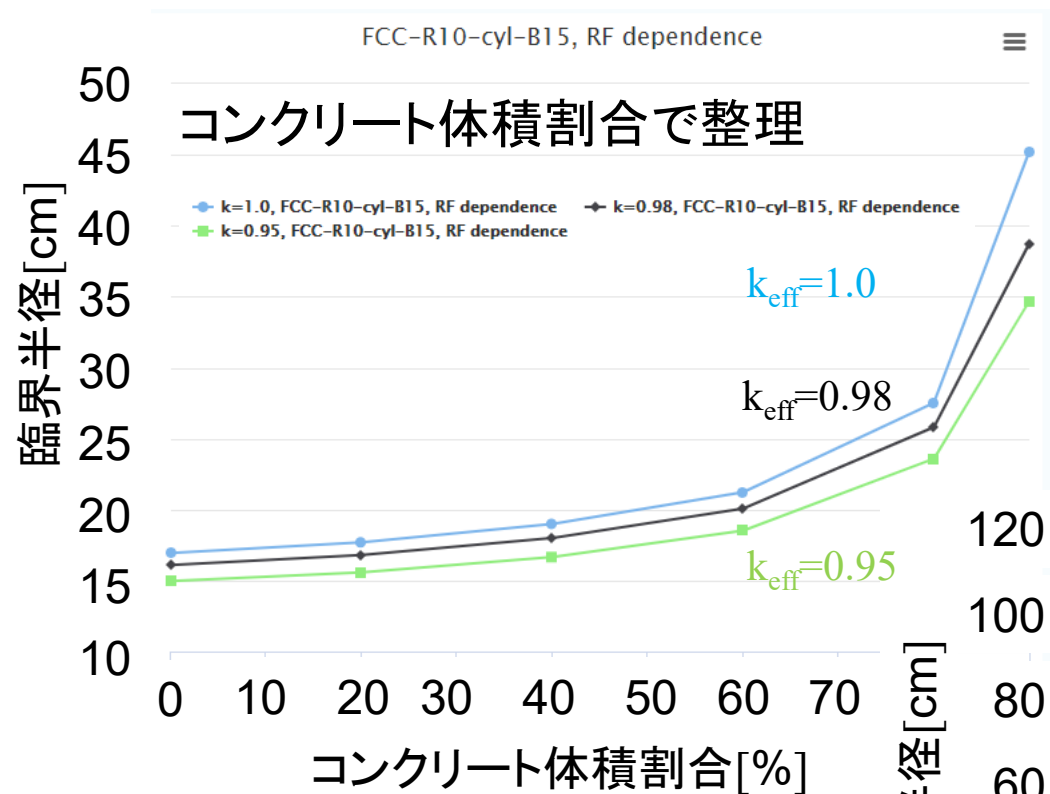
使用者が見やすい形で整理

どの程度で臨界となるか

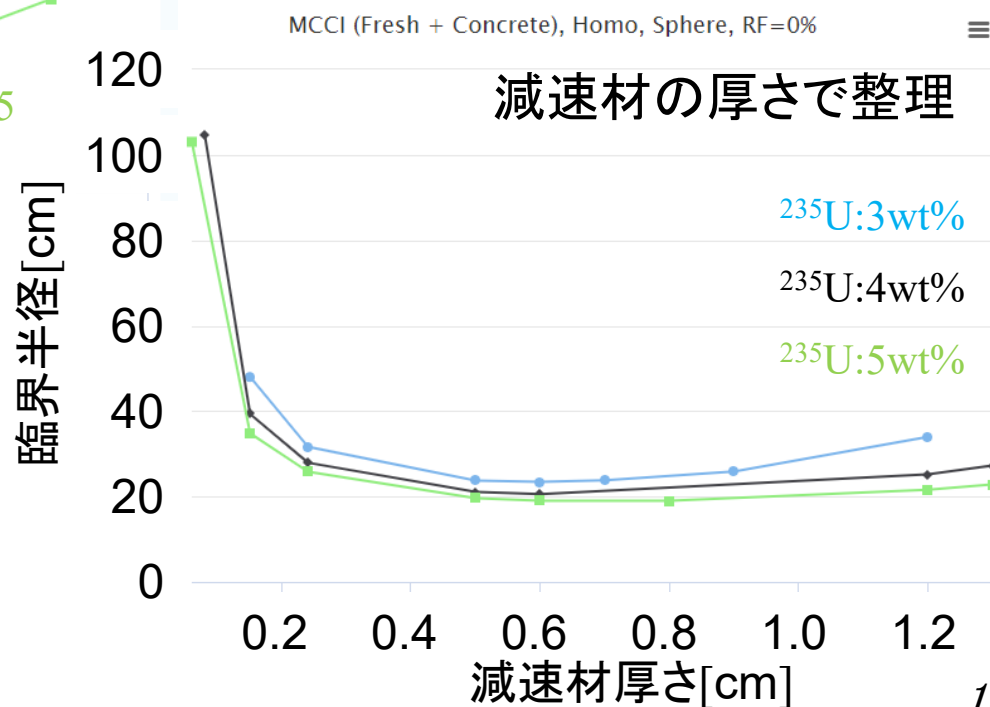
- 臨界半径
- 臨界質量
- etc.

パラメータで
整理

臨界特性データ



解析で得られた結果を
 任意のパラメータで整理



本発表の目的

- 多数の解析作業の管理のための、
臨界基礎データベースの紹介
- データベースシステムを用いた
臨界特性解析によって得られた知見の紹介

多様なデブリ組成に対する解析

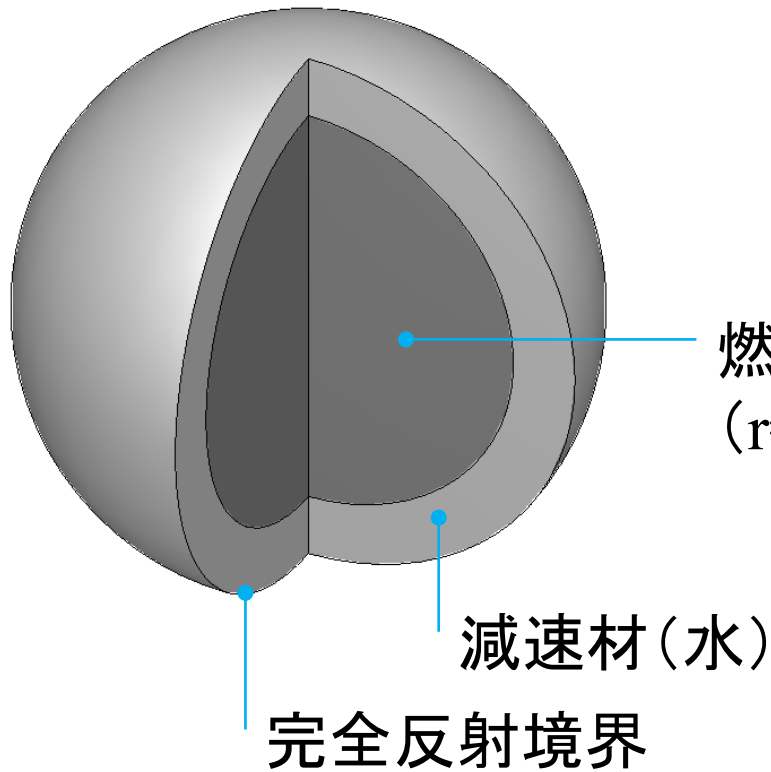
これまでに実施した解析

- 燃料組成: 新燃料(濃縮度3、4、5wt.%)
 燃焼燃料(5.2、15.2、24.2、33.3、37.5、40.2 GWd/t)
燃料装荷パターンを考慮した燃料の混合
- 混合物: コンクリート、SUS316
- 混合物体積割合: 0%～90vol.%
- 減速条件 (V_m/V_f^*): 0.01～26

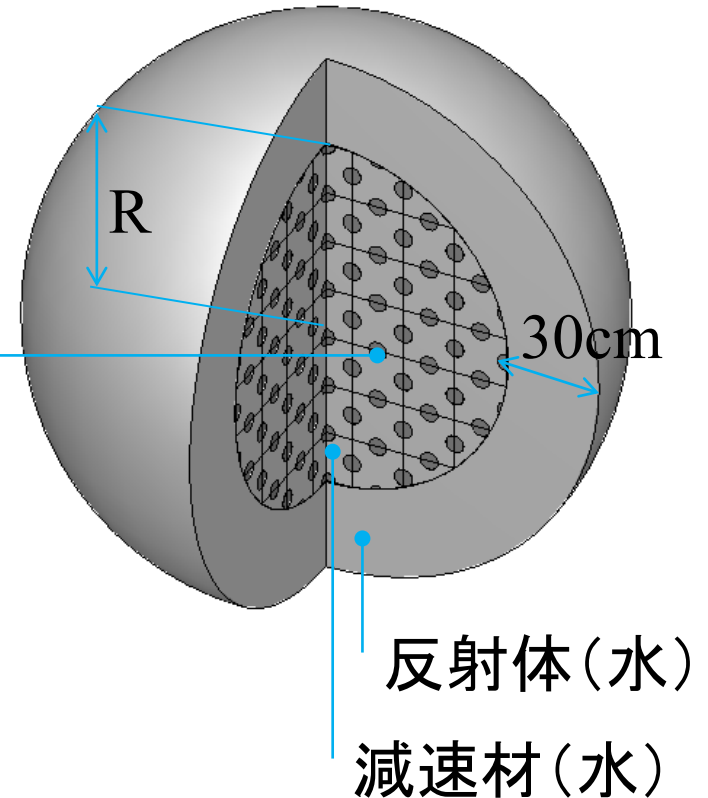
$$*V_m/V_f = \frac{\text{水体積}}{\text{燃料混合物体積}}$$

解析体系

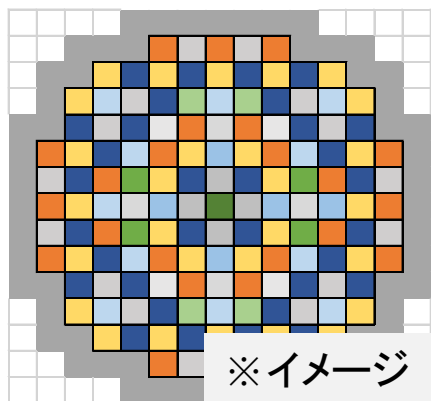
無限体系 (無限増倍率計算)



有限体系 (臨界量計算)



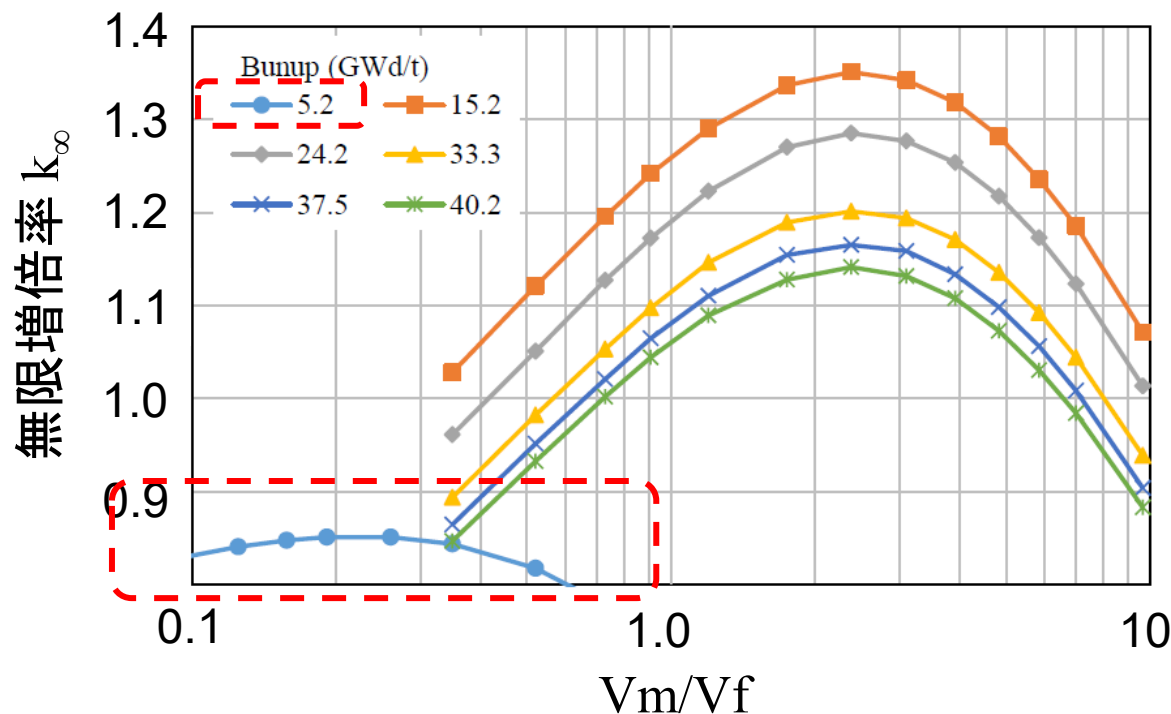
燃焼度・装荷パターンに着目した解析*



炉心には様々な燃焼度の燃料が装荷
燃焼度によって組成が大きく異なる

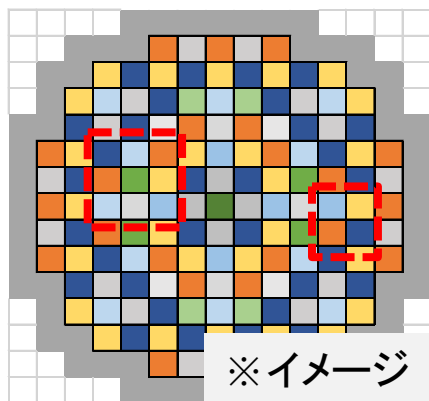


異なる燃焼度の燃料は臨界特性が異なる



- 1サイクル目燃料 (5.2GWd/t)は未臨界となる

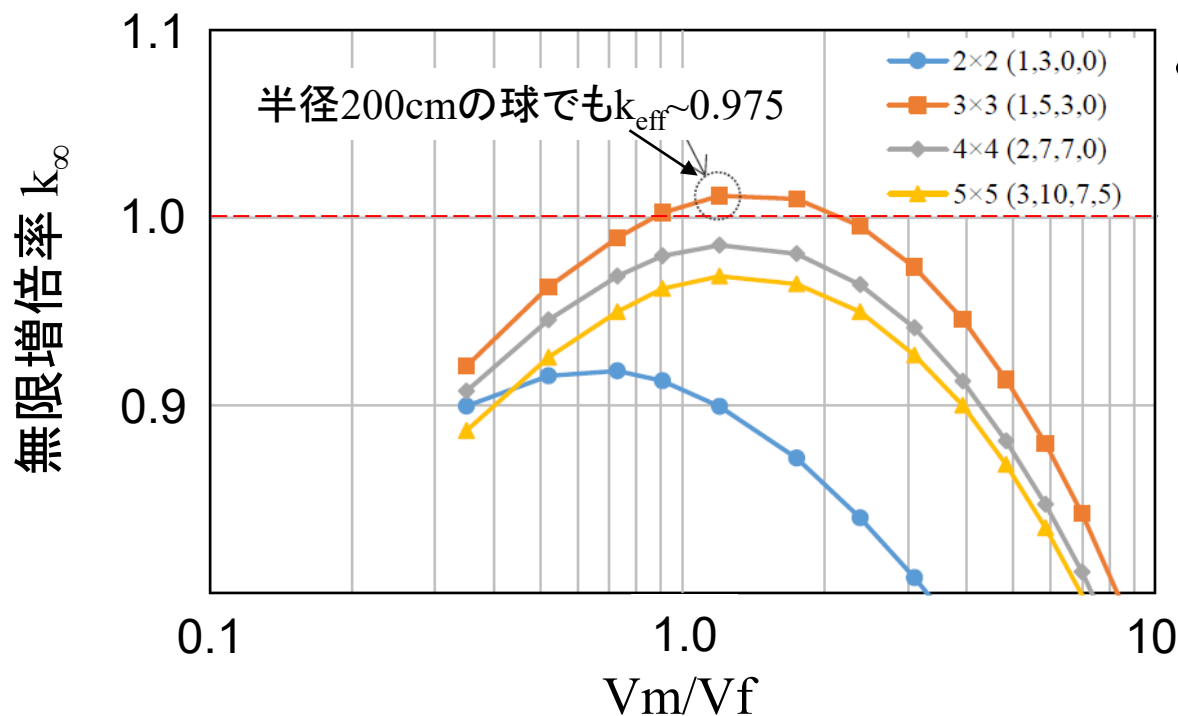
燃焼度・装荷パターンに着目した解析*



燃料が溶融して混合する場合、
混合の仕方は装荷パターンに依存すると考えられる



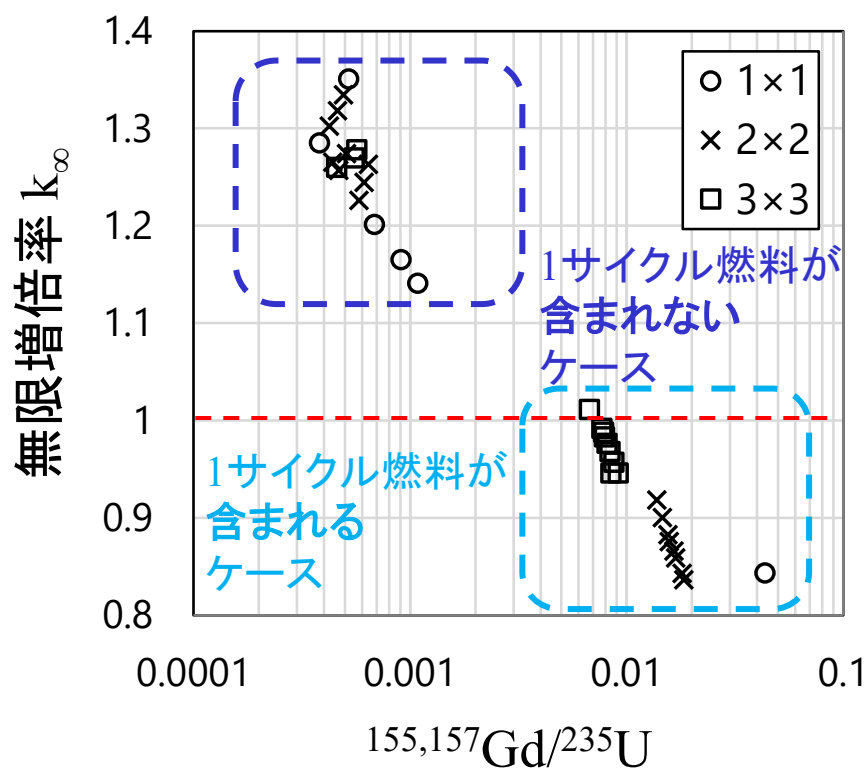
実際の装荷パターンを基に
1サイクル目燃料が含まれる場合の臨界特性を評価



- 1サイクル目燃料が均一に含まれた場合、
臨界となる可能性は極めて小さい

燃焼度・装荷パターンに着目した解析*

- 燃焼度・装荷パターンを用いた臨界特性データを $^{155,157}\text{Gd}/^{235}\text{U}$ をパラメータとして整理



$$^{155,157}\text{Gd}/^{235}\text{U} = \frac{^{155,157}\text{Gdの原子個数密度}}{^{235}\text{Uの原子個数密度}}$$

- $^{155,157}\text{Gd}/^{235}\text{U}$ と k_{∞} との間に強い相関がみられる
- $^{155,157}\text{Gd}/^{235}\text{U}$ が一定以上であれば臨界となる可能性は小さいと考えられる。
- $^{155,157}\text{Gd}/^{235}\text{U}$ が臨界特性を**特徴づけるパラメータ**として期待される



まとめ・今後の計画

☑ 臨界リスク基礎データベースシステムの開発

- データの整備・拡充ため臨界リスク基礎データベースを開発した。
- 膨大な量の解析の実施に役立てることができた。

☑ 燃焼度と装荷パターンに着目した解析

- 1サイクル目燃料が均一に含まれる体系では未臨界となる可能性が極めて高いことが明らかとなった。
- $^{155,157}\text{Gd}/^{235}\text{U}$ が臨界特性を特徴付けるパラメータになる可能性が示唆された。

□ 完全に溶融していない燃料に着目した解析

- 燃料が完全に溶融せず原型を留めたまま周辺のもの混合しているケース、切り株状に燃料が融け残ってるケース等については十分に検討できていない。

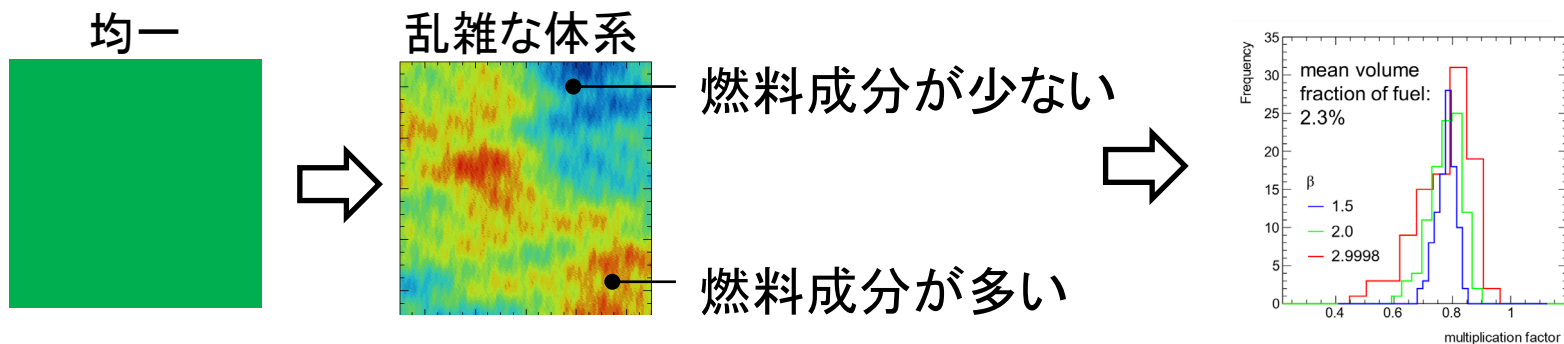
今後の計画

□データベースのユーザビリティの向上

- データの整理機能などで機能の向上が必要となっている。

□空間的な乱雑さを考慮した臨界特性評価データの収録

- 組成分布のムラ(不均一さ)をモデル化する手法が開発¹され、Solomonコード²に実装されている。
- このムラの程度によって増倍率が分布を持つことが示されており³、組成分布の不確かさを考慮したデータになることが期待される。



1. T. Ueki, Jour. Nucl. Sci. Technol., 54(3), pp. 267-279 (2017).

2. Y. Nagaya et al, ICNC2019, Paris, France, September 15–20, 2019.

3. S. Araki et al, Physor2020, Cambridge, UK, Mar. 29th – April 2nd, 2020, 1241(2020).

ご清聴ありがとうございました。