

平成 28 年度
デブリ取出時に想定される
種々状況下での臨界性評価

東京都市大学
原子力安全工学科/共同原子力専攻
講師 竹澤 宏樹
教授 高木 直行

背景

- 現在のところ、燃料デブリ取り出しは冠水後に行う方式が主概念とされている。
- デブリ取り出し作業時においては、臨界性に大きな影響を与える水/燃料体積比が変化することが考えられるほか、燃料系の形状、寸法も変わり得る。
- すなわちデブリ取り出し方法やそのプロセスは、デブリ臨界性と強い関係性があるため、考え得る種々状況下での臨界性を把握しておく必要がある。

シナリオの想定

- 水体積比や燃料デブリ組成・形状変化
→ 臨界性を変化
- 生じうるシナリオは？
- 冠水法
 - 回収作業・移送中の燃料デブリの落下
 - 作業時の地震や振動
 - 冷却材流れや作業に伴う粉末状デブリ巻き上げ
 - 炉心外への流出
- 気中法
 - 減速材無し

本年度検討の目的

デブリ回収作業中に臨界性を変化させ得る
様々な状況を想定し、どのような場合でも未臨
界確保が可能な**デブリ掘削・回収量の上限值**
を評価すること。

評価項目

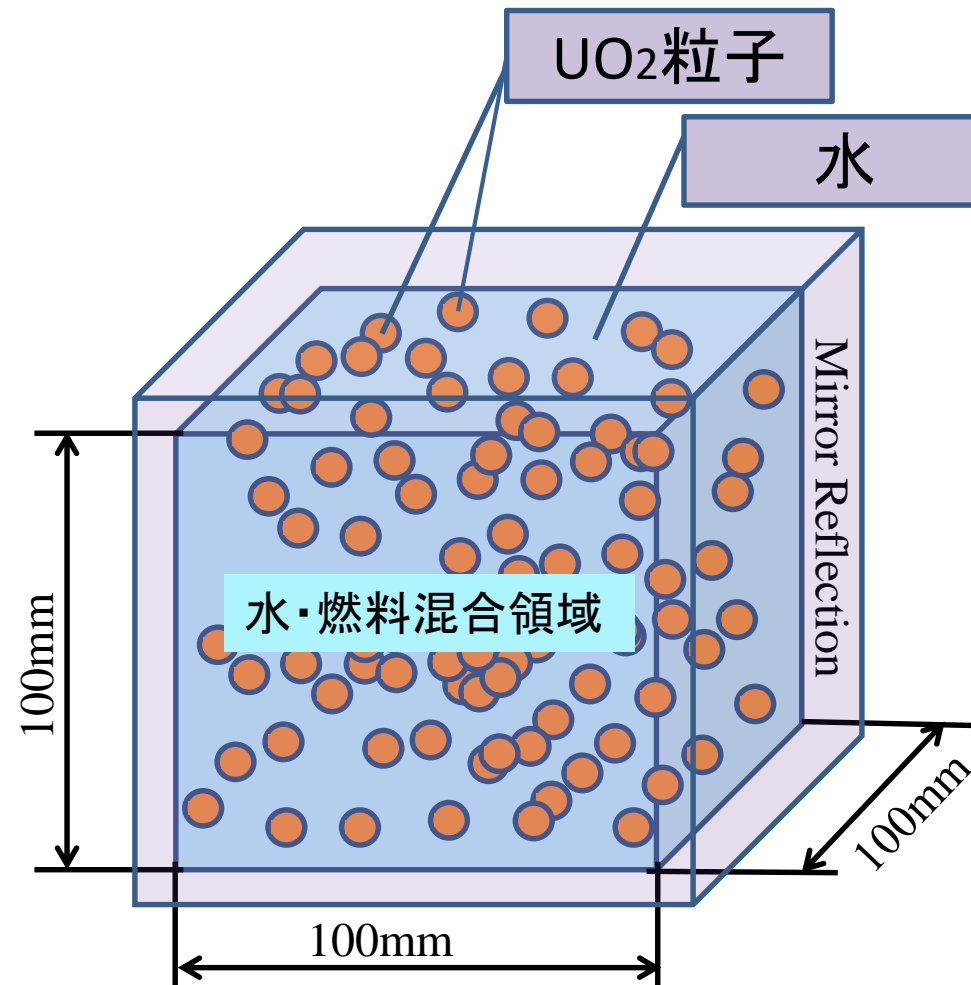
下記状況における臨界性を評価

- ① 燃料取り出し作業に伴う、水体积やデブリ組成・形状の変化時
- ② 燃料デブリ落下時
- ③ 作業時の振動や地震による燃料デブリ形状、寸法変化時
- ④ 冷却材流れや作業に伴う粉末状デブリ巻き上げ時
- ⑤ 炉心外へ流出時
- ⑥ 気中法での取り出し時

①水体积や燃料デブリ組成・形状変化時の 臨界性影響

- 燃料取出し作業に伴い、水体积比・燃料デブリ組成・形状は無数の状態を取りうるため、まずは無限体系デブリ粒子と水の混合状態についての最適臨界条件を検討
- 粒径および燃料体積比変化させた際の無限増倍率を算出
 - 解析コード： 汎用中性子・光子輸送計算モンテカルロコードMVP-2.0
 - 核データライブラリ： JENDL-4.0

臨界解析モデル



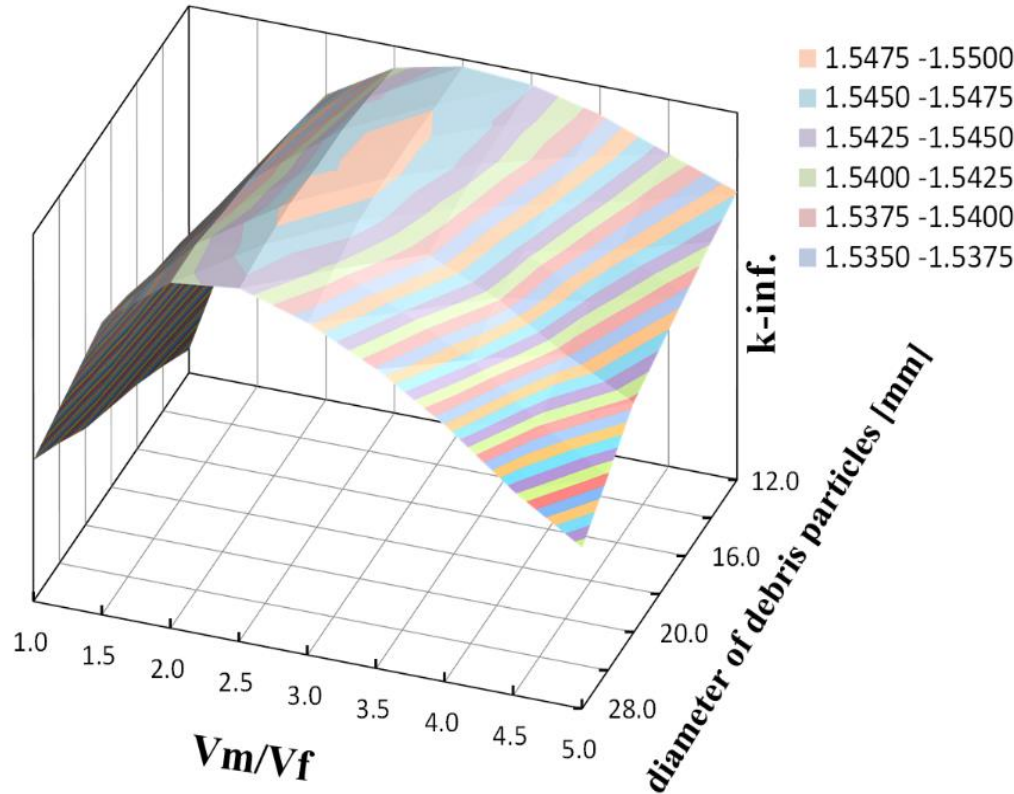
- パラメータ

- 水対燃料体積比
(V_m/V_f)

- UO₂粒子直径

- 境界条件: 完全反射材

デブリ粒径や V_m/V_f と臨界性



最適臨界条件

V_m/V_f = 約2.4

粒子直径 = 2.0cm

(出展: 2014年春の年会 軽水炉溶融燃料取り出し方策およびその際の臨界安全管理(12)
粉末状デブリ巻上げ時および連続・非連続相デブリの臨界安全管理)

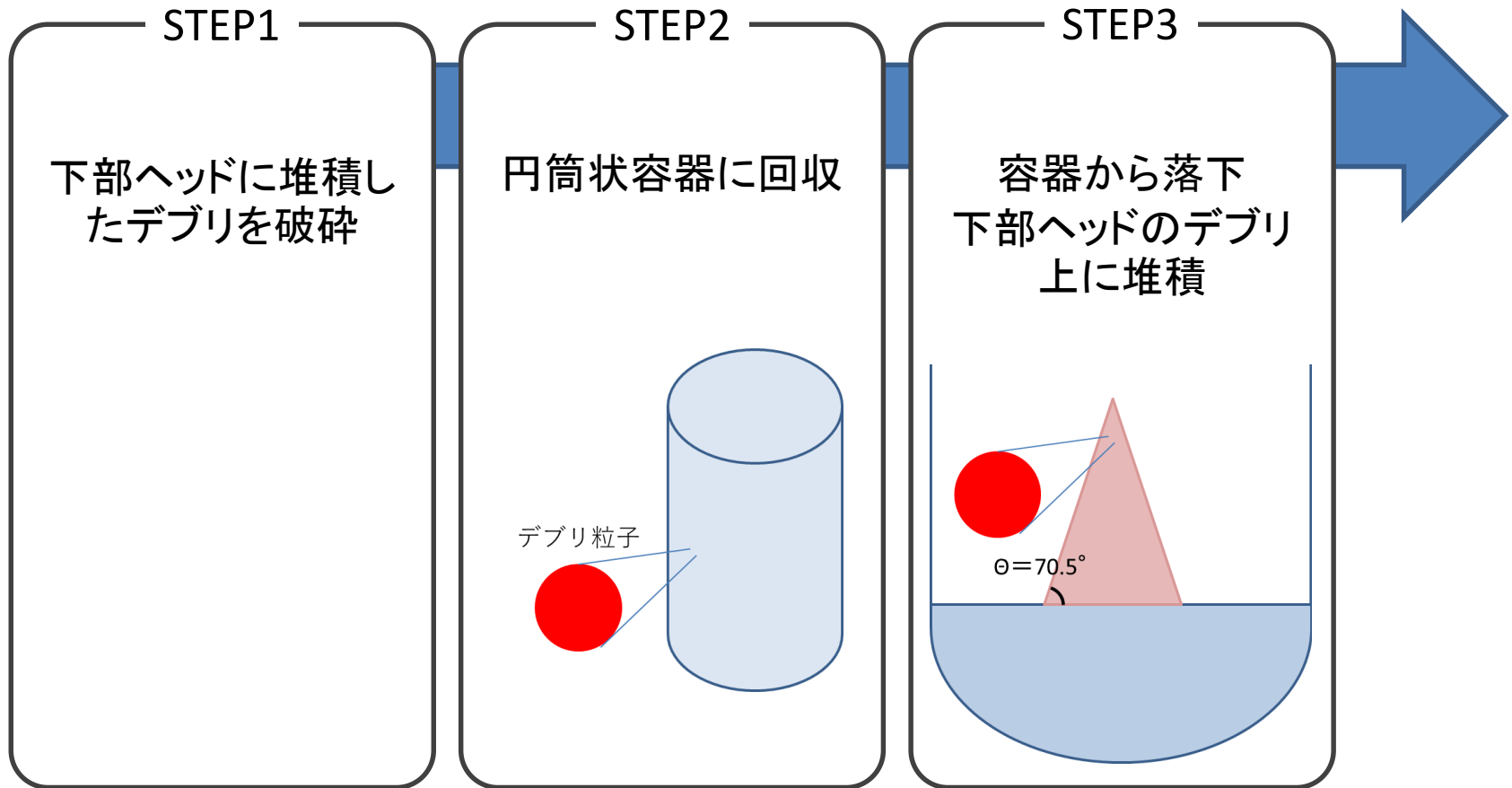
②燃料デブリ落下時の臨界性影響

- 想定シナリオ
 - 原子炉圧力容器下部ヘッドに堆積したデブリを粒子状に破砕
 - 円柱状容器へ回収
 - 回収したデブリが容器から落下
 - 下部ヘッドに(デブリ)上に円錐状に再堆積



- 下部ベッドデブリとの相互作用があっても未臨界となるようなデブリ回収容量の検討

回収～落下のシナリオ

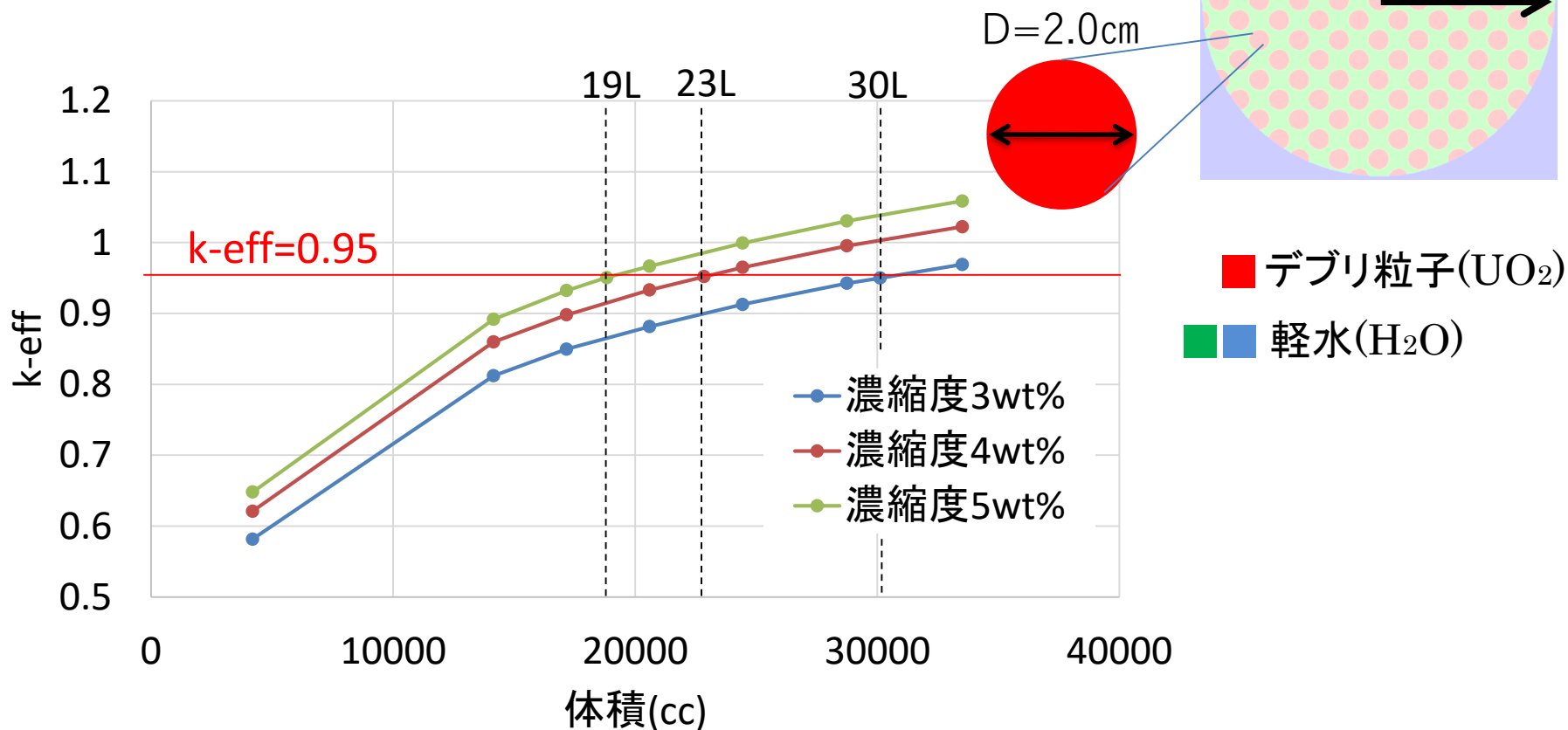


解析条件

- デブリ粒子の配置方法： 面心立方格子配置
 - 昨年度の実績より、配置粒子半径が大きい場合に保守的解析となるランダム配置(STGM)ではなく、規則的な配置方法を選択
- デブリ粒子の仕様パラメーター：
 - 粒子組成： UO_2
 - U-235濃縮度： 3.0～5.0wt%
 - 粒子直径： 2.0cm
- 未臨界判定範囲： $k\text{-eff} \leq 0.95$

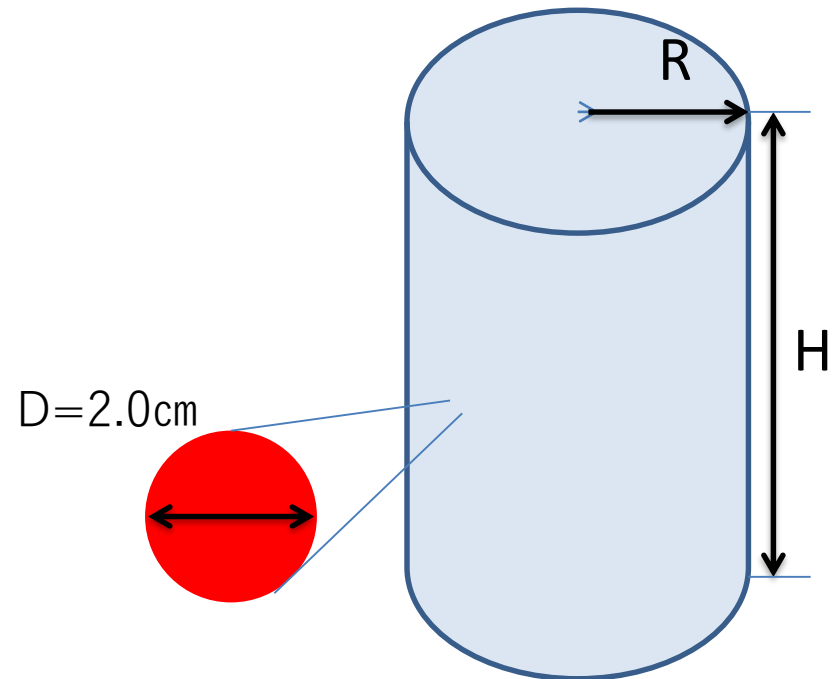
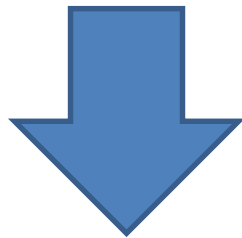
球状分布での最小臨界体積

- 円柱形状評価に先立ち、最保守的条件となる球状分布での k_{eff} を評価



回収容器の形状

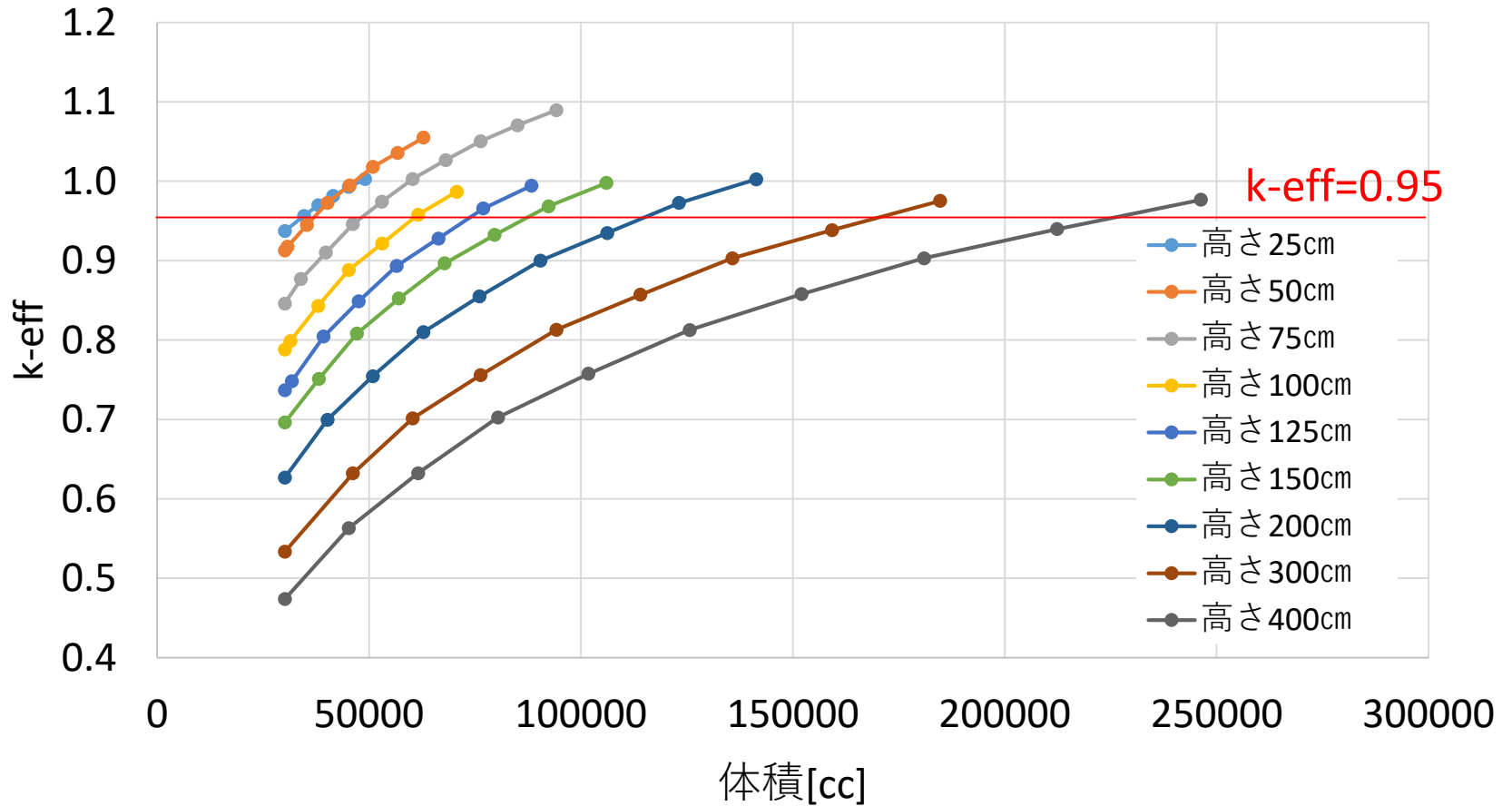
- 現実的な取り出し形状として円筒形を想定
- パラメータ: 体系の半径R
体系の高さH
デブリ濃縮度(3,4,5wt%)



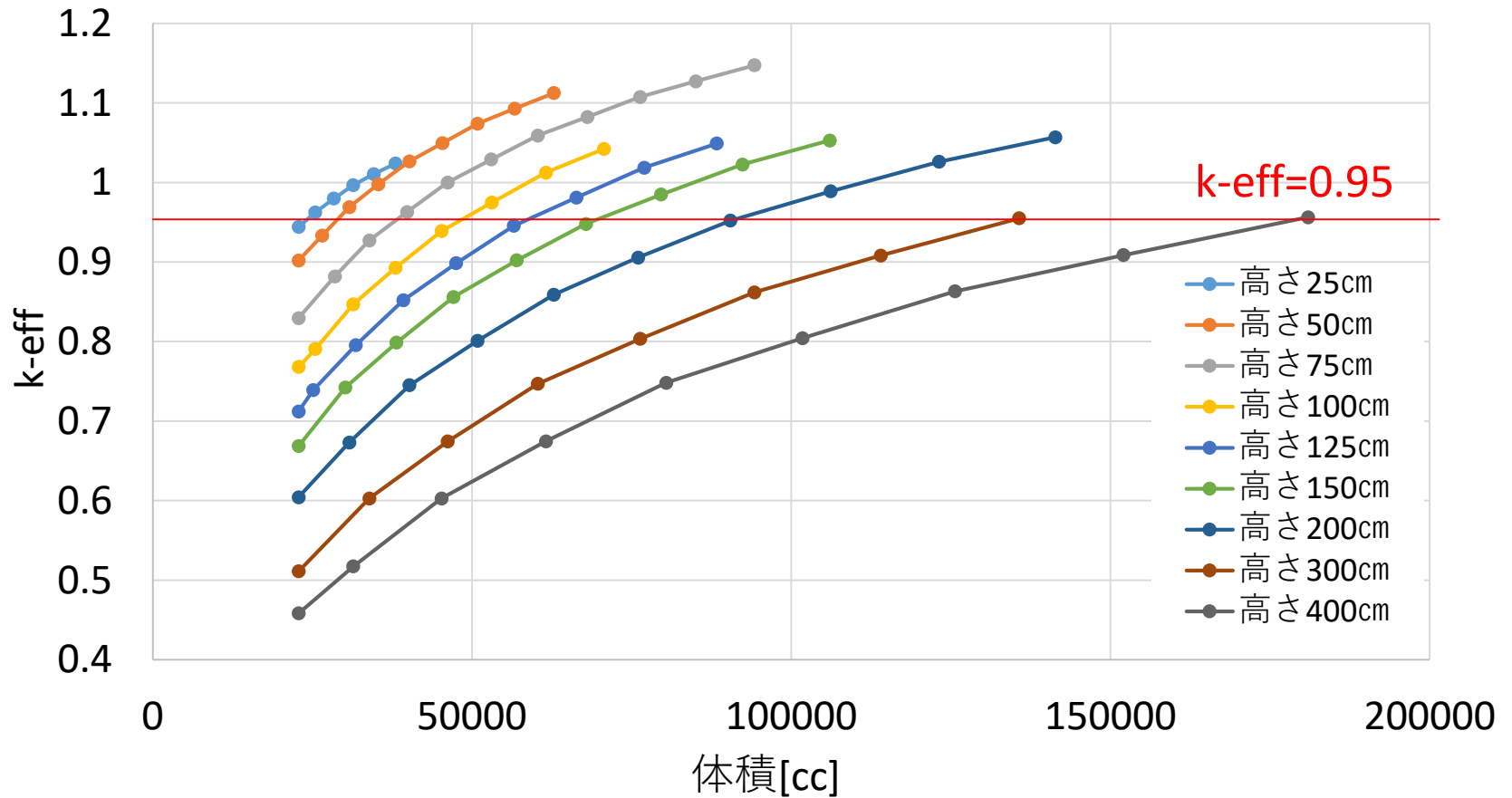
形状変化による実効増倍率の変化を評価

図 デブリ回収容器

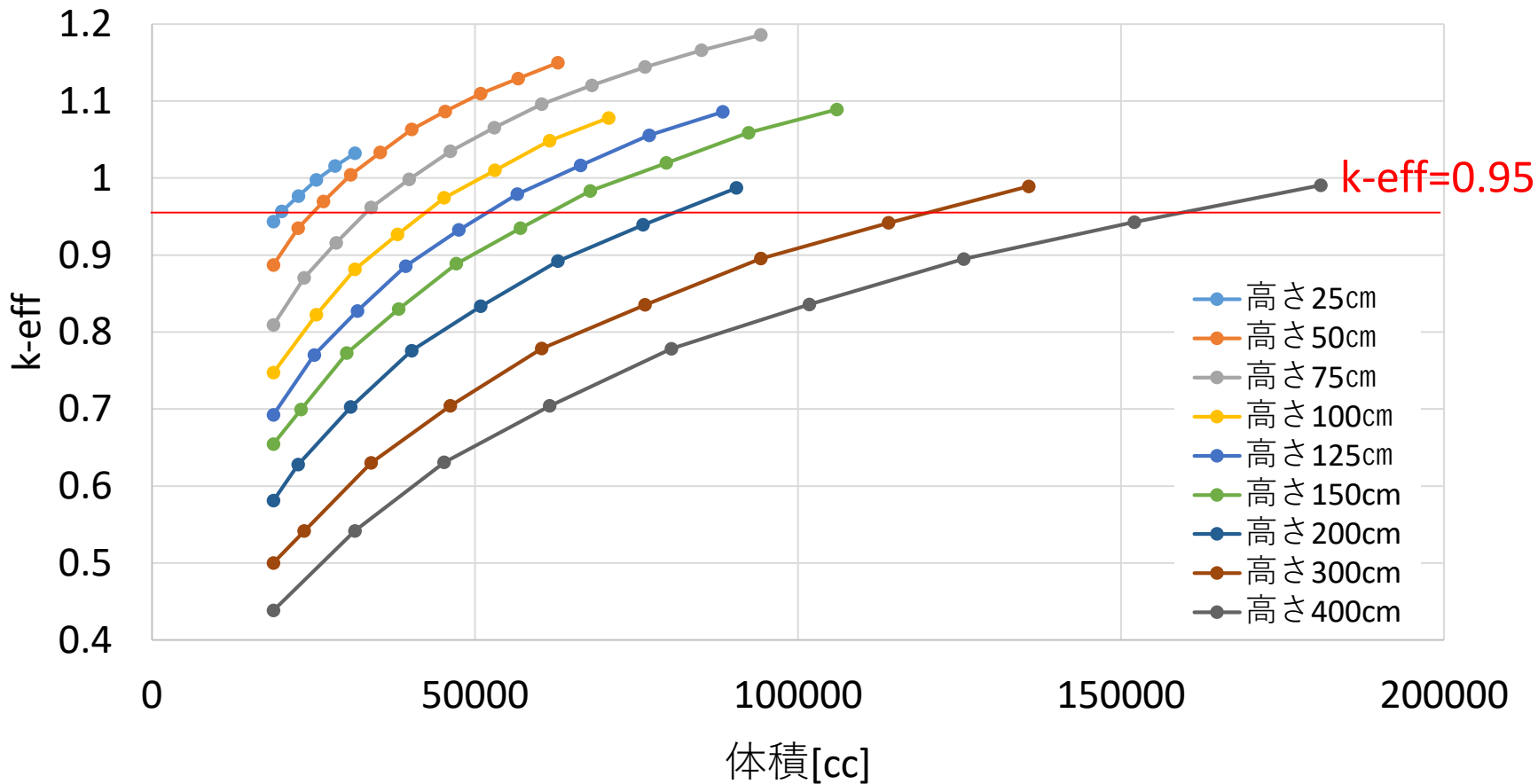
円筒容器のサイズとk-eff(濃縮度3wt%)



円筒容器のサイズとk-eff(濃縮度4wt%)



円筒容器のサイズとk-eff(濃縮度5wt%)



円筒回収容器臨界性評価のまとめ

- 円筒形状の高さが高くなるほど、
軸方向への漏れが大→臨界性は低下→デブリ収容量増大
- 現実的な取出し容器形状としては、容器高さ100cm程度？

表 容器寸法と実効増倍率

容器体積(L)	keff	容器高さ(cm)	容器半径R(cm)
19.4	0.949	25	15.7
24.1	0.949	50	12.4
32.2	0.948	75	11.7
41.5	0.949	100	11.5

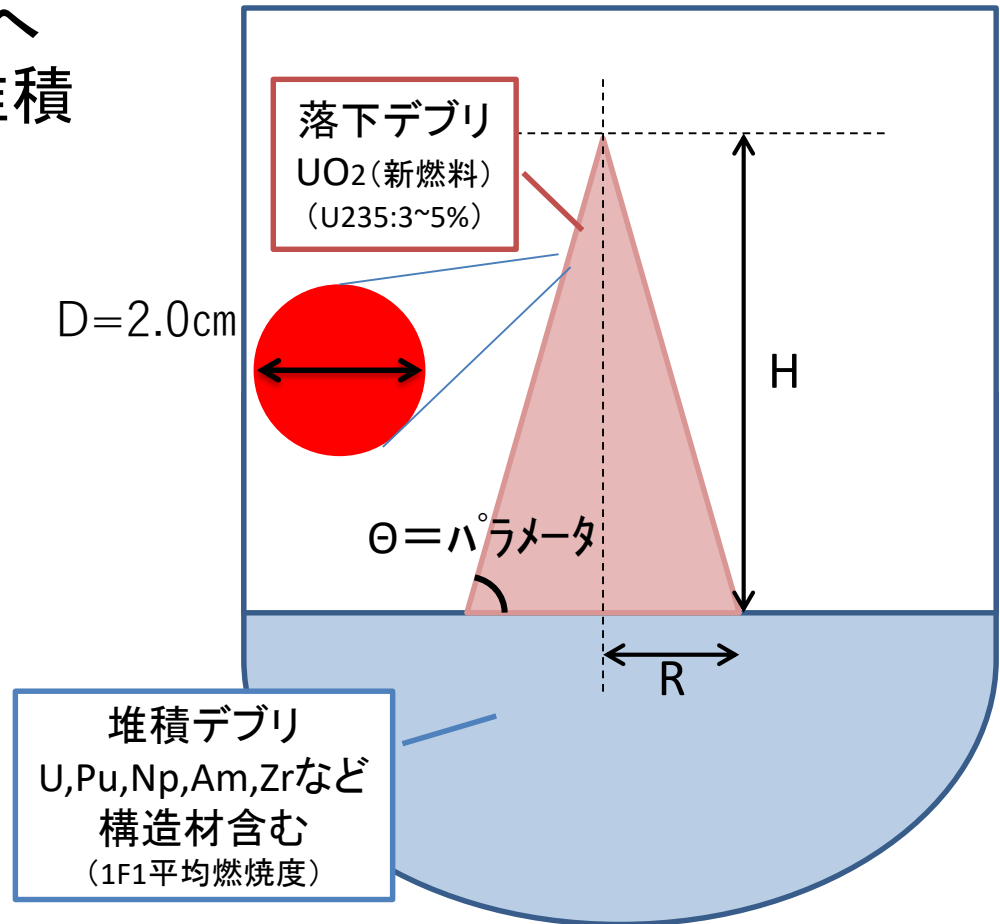


容器が破損し、デブリが流出・堆積した場合でも臨界安全は担保できるだろうか？

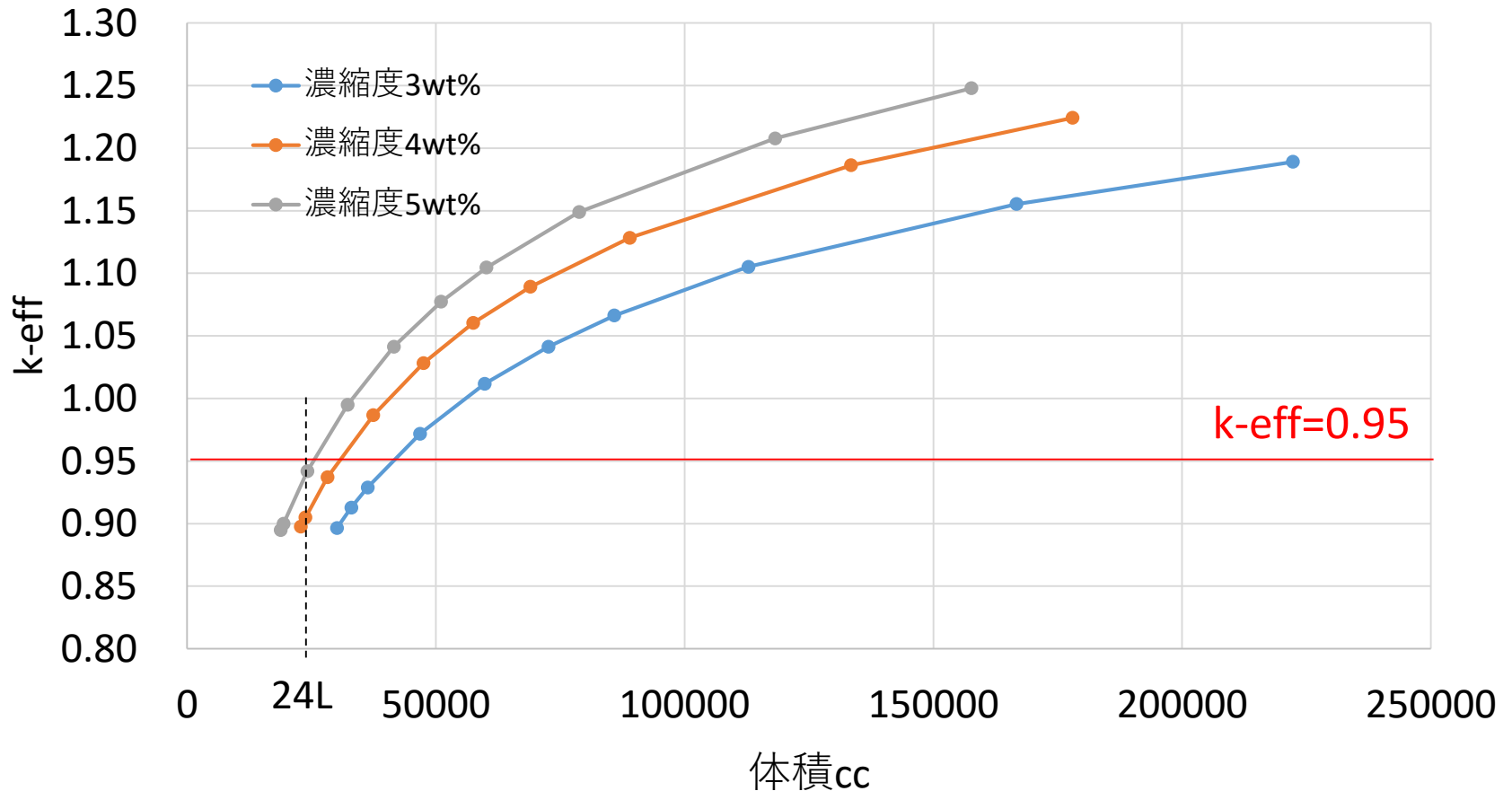
堆積デブリの堆積量や形状が 臨界性へ与える効果

回収容器のデブリが床面へ
全量 ($k\text{-eff} \leq 0.95$) 落下・堆積
することを想定

- 堆積形状: 円錐
- パラメータ:
 - デブリ濃縮度 (3, 4, 5 wt%)
 - 円錐の底角 $\theta = 70.5^\circ$
(円錐の表面積最小)

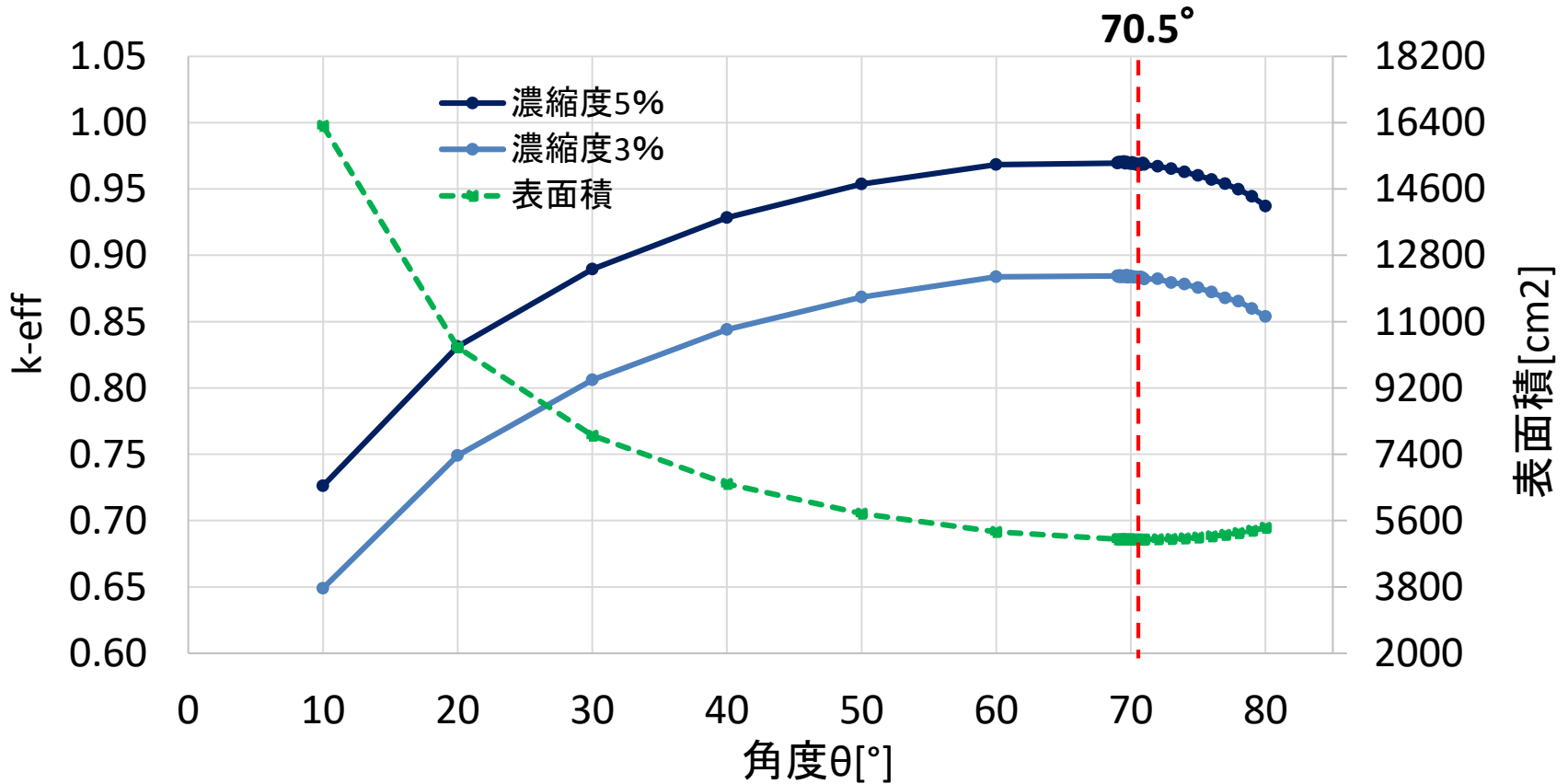


円錐状堆積デブリの堆積量と臨界性



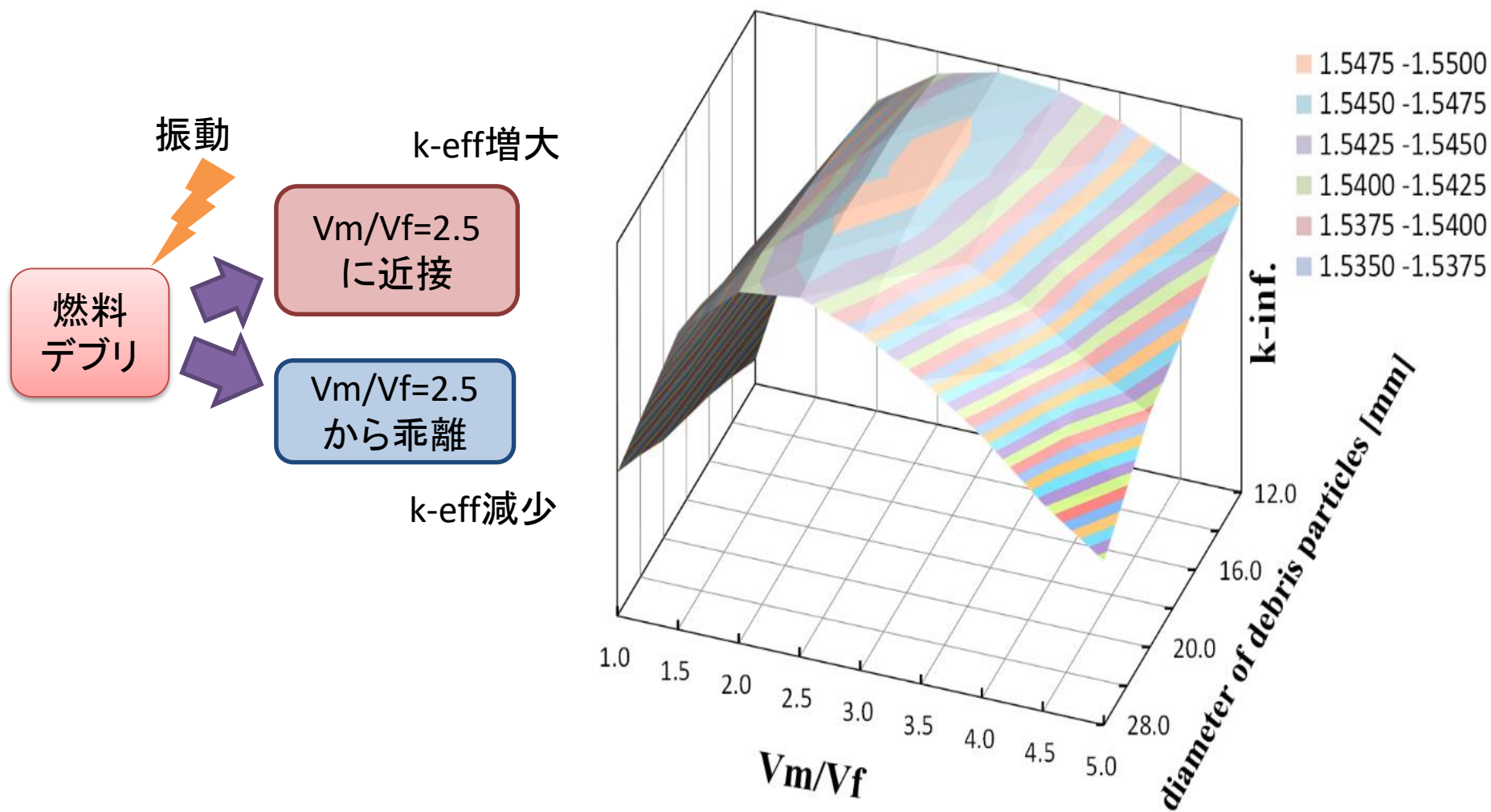
取出しの最大量は、3wt%では36.3L、4wt%では28.2L、5wt%では24.2Lである。

円錐状堆積デブリの堆積角度と臨界性



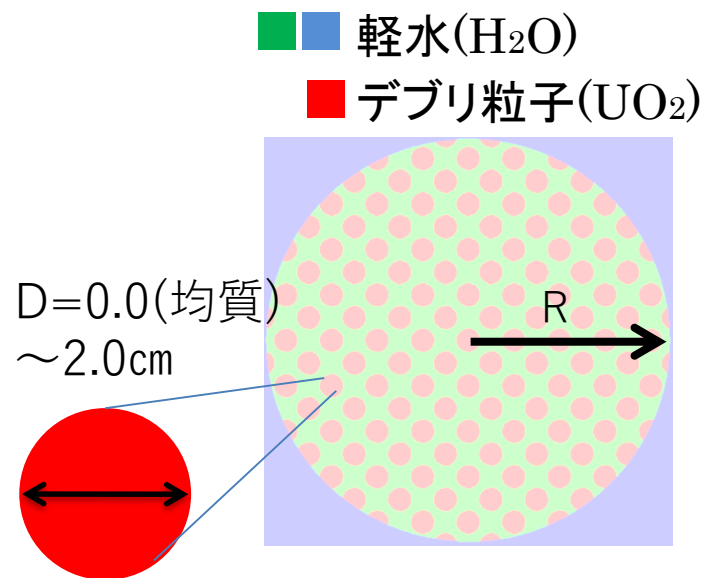
円錐状堆積デブリが水中に単独で存在している場合の解析例

③作業時の振動や地震による燃料デブリ形状、寸法変化時の臨界性影響



④冷却材流れや作業に伴う粉末状デブリ巻き上げ時の臨界性評価

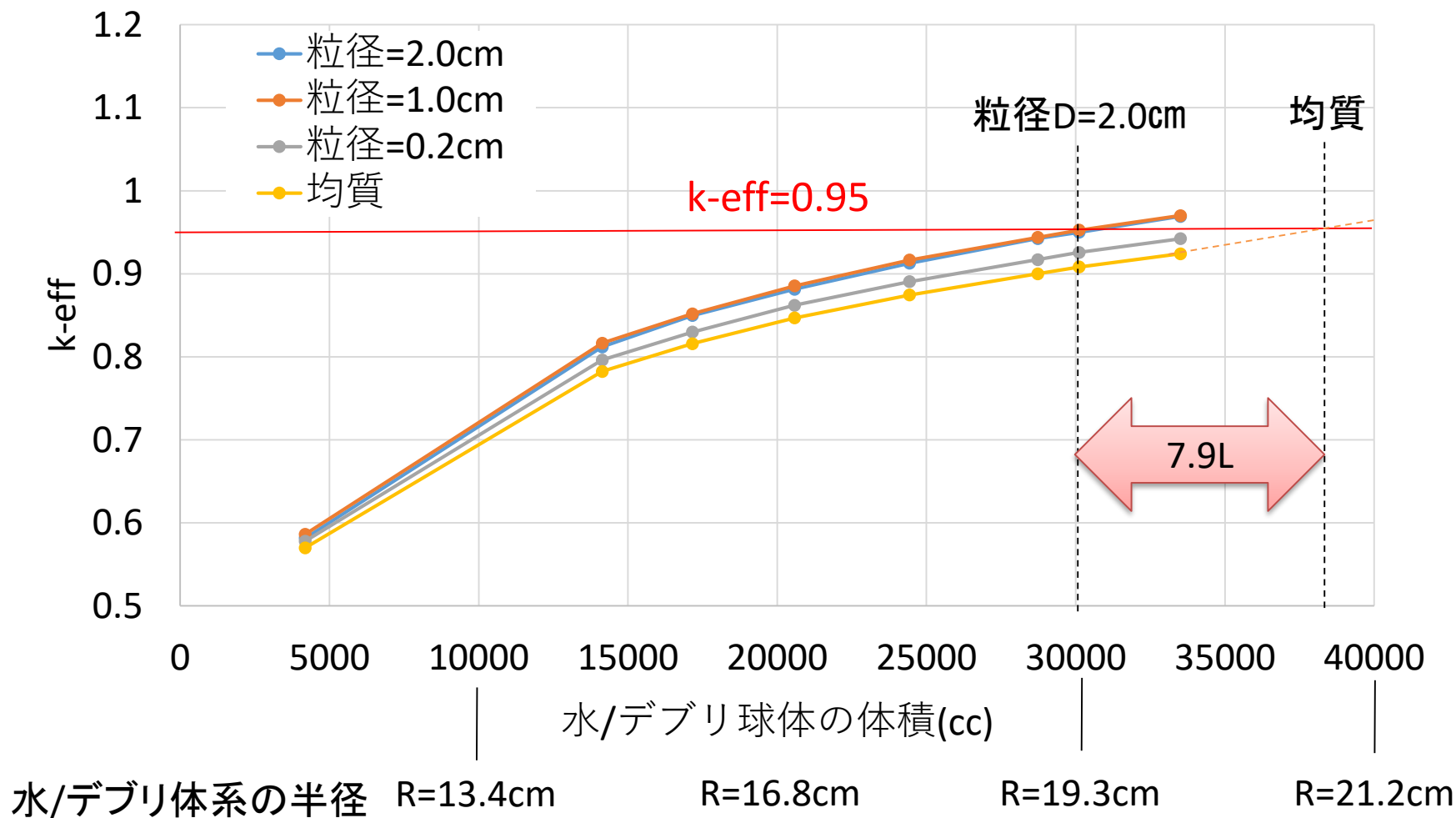
- 巻き上がるデブリの粒子は小さく、粒子でなく均質な溶液とみなすことができる
- 想定条件下では、粒子径 $<30\mu\text{m}$ で非均質効果はほぼ完全に失われ臨界性は低下*
- 粒径 $D=0.0\text{cm}$ の均質ケースと、比均質効果が最大となる $D=2.0[\text{cm}]$ のケースで、実効増倍率、臨界体積の違いを評価



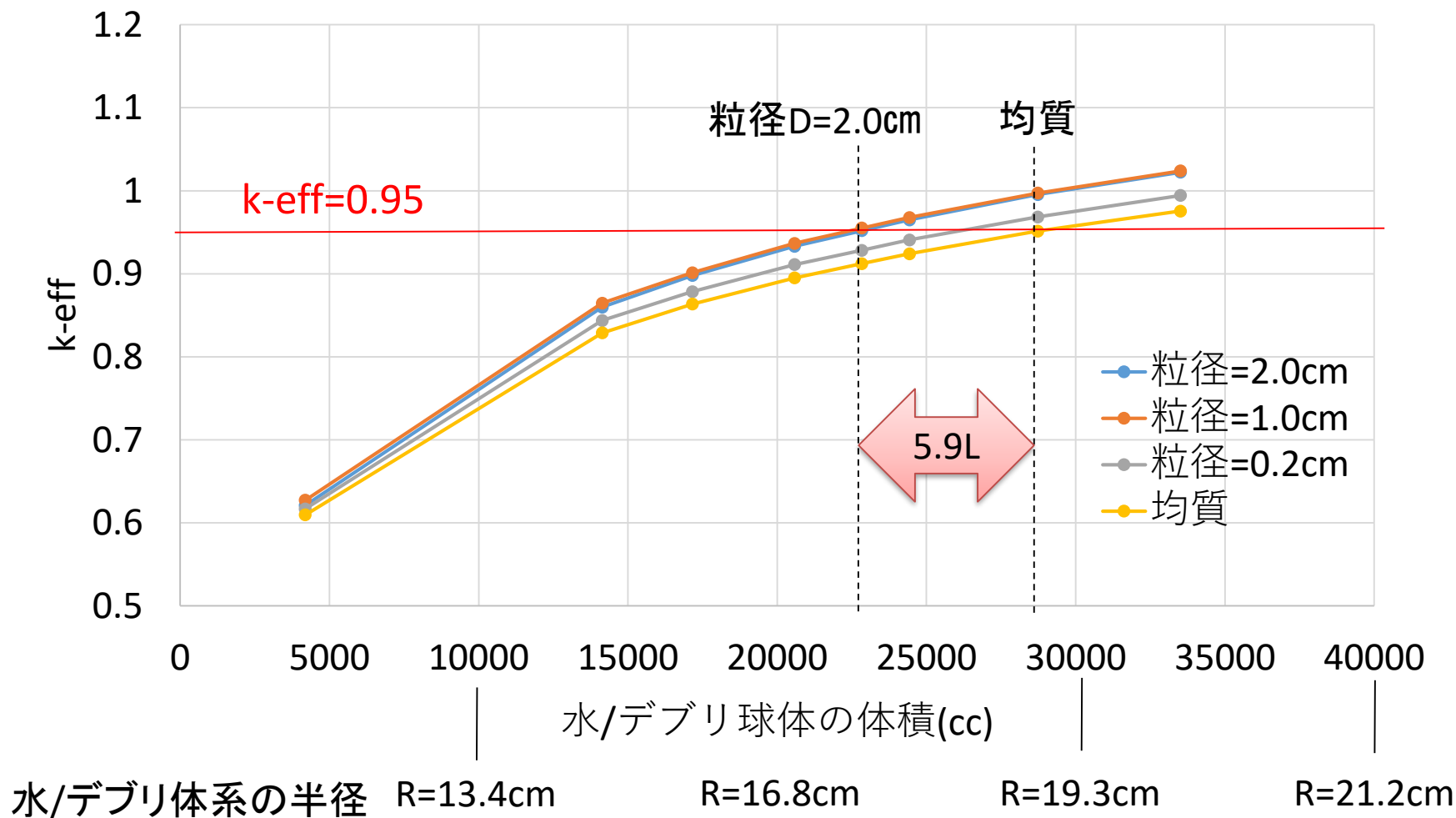
水中で巻き上げられた
粉末デブリの解析体系

* 加藤貴士,高木直行,松本哲男,塩谷亮平,石島善三
軽水炉熔融燃料取り出し方策およびその際の臨界安全管理
(12)粉末状デブリ巻き上げ時および連続・非連続相デブリの臨界安全管理
日本原子力学会 2014年春の年会 2014/3/27

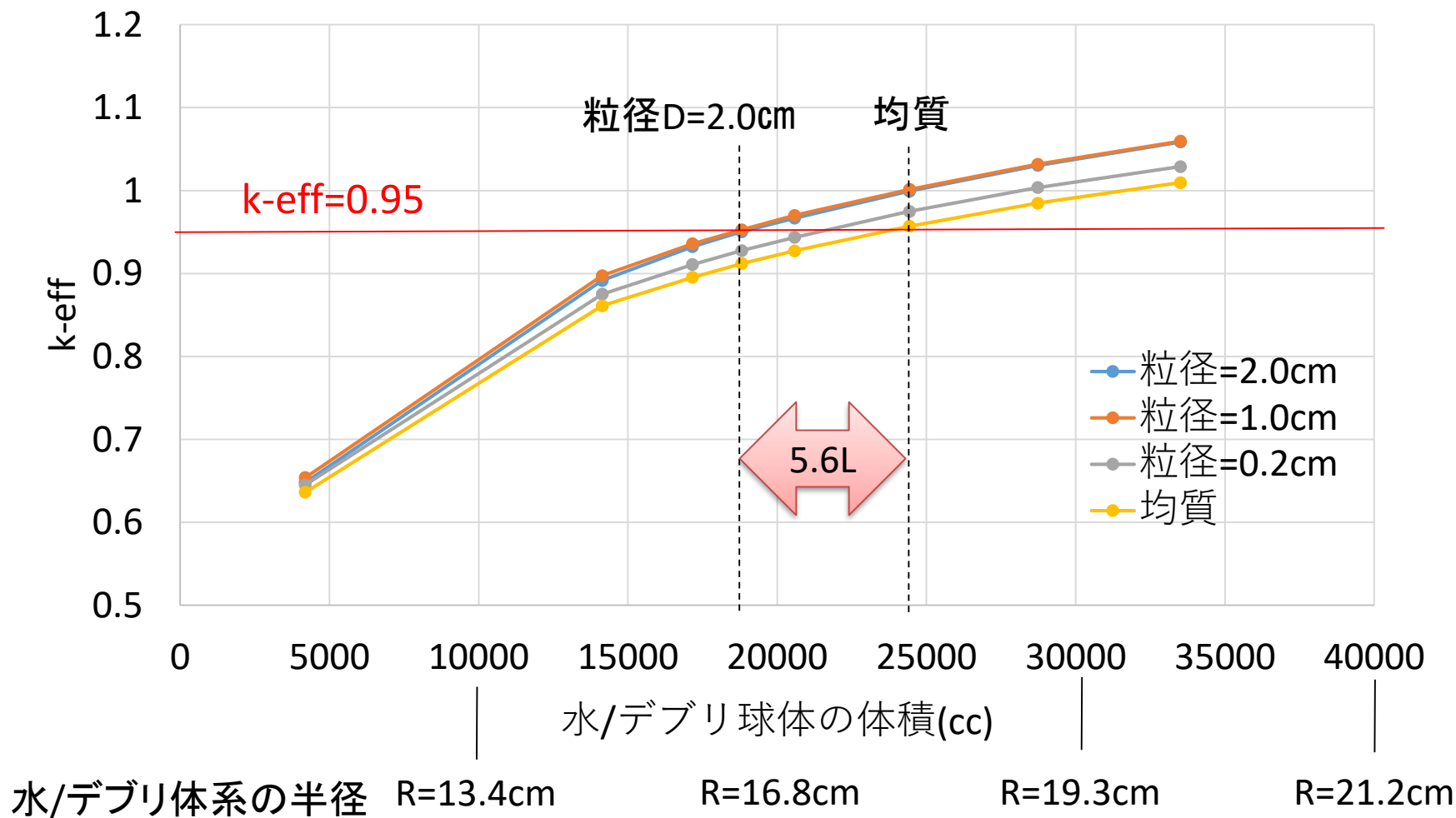
巻き上げられたデブリの量や粒径とkeffの関係 (濃縮度3wt%)



巻き上げられたデブリの量や粒径とkeffの関係 (濃縮度4wt%)



巻き上げられたデブリの量や粒径とkeffの関係 (濃縮度5wt%)



粉末状デブリ巻き上げ臨界性のまとめ

- 巻き上げられたデブリは直径約30cm、体積18.8L (52.2kg) で $k_{eff}=0.95$ に
- デブリ回収作業時の未臨界確保には、破砕量を18.8L (52.2kg) 以下に制限することが望ましい
- 但し、デブリの粒径 D が2cmから小さくなるにつれ、非均質効果が弱まり臨界性低下→臨界体積増
 - デブリをmmサイズ以下に微細化する場合、粉砕量制限は5L程度増加する
- さらに、デブリへの構造材含や、燃焼度を考慮すると、臨界制限はさらに緩和される

⑤炉心外へ流出した燃料デブリの臨界性

- 流出場所として気中、水中の2ケースを想定する

気中に流出するケース

考え得る状況:

オペレーションフロア床面に落下

臨界性:

空気と水では減速性能に差があるため深い未臨界を保つことができる。

(検討⑥を参照)

水中に流出するケース

考え得る状況:

回収容器をキャニスタに収納する際、燃料貯蔵プール内に流出

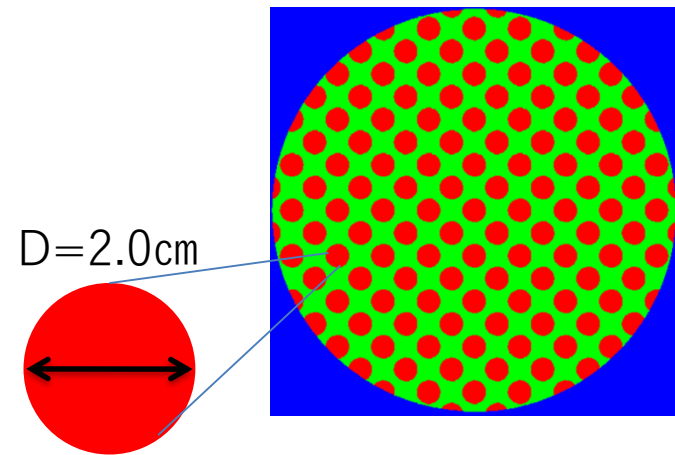
臨界性:

②で検討した取り出し量や条件を遵守しているならば臨界安全上問題はない。

⑥ 気中取り出し法での臨界性評価

- 空気と軽水では減速能が大きく異なり、体系から水が無くなることで臨界性は低下は容易に予想される
- 定量評価
 - 水/デブリが混在する右の保守的条件下で水が空気に置換された際の臨界性を評価
 - $-56.1[\%dk/kk']$ の負の反応度
- 軽水炉燃料条件では気中の臨界は考えられない

- デブリ粒子(UO_2 : 5wt%)
- 軽水(H_2O) or VOID
- 完全反射境界

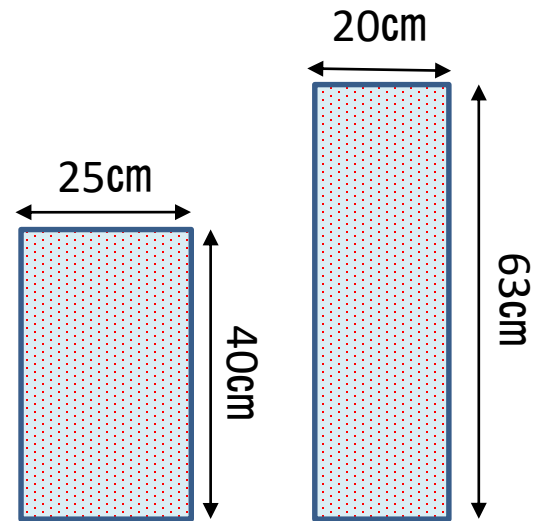


雰囲気	k-inf
H_2O	1.543
VOID	0.827

本年度検討のまとめ

- デブリ取出し時に想定される様々な状況(水体积比変化、形状変化、デブリ落下、振動、巻き上げ、流出、気中)における臨界性を評価
- その結果、未臨界を確保するためのデブリ掘削・取出量はデブリ落下・堆積時の容量によって制限され、約15L($k_{床} \doteq 0.8$)から約20L($k_{床} \doteq 0.4$)とすることが望ましいとの結果を得た。

$k_{床}$: 回収容器から落下する粒子状デブリが堆積する床デブリの実効増倍率



デブリ回収容器(約20L)の形状例