

使用済燃料の直接処分場の概念

- 熱解析の結果
- 処分場パネル設計

平成16年9月24日

1. 熱解析の結果

熱解析モデル

解析モデル領域, 境界条件及び初期条件

解析モデル領域

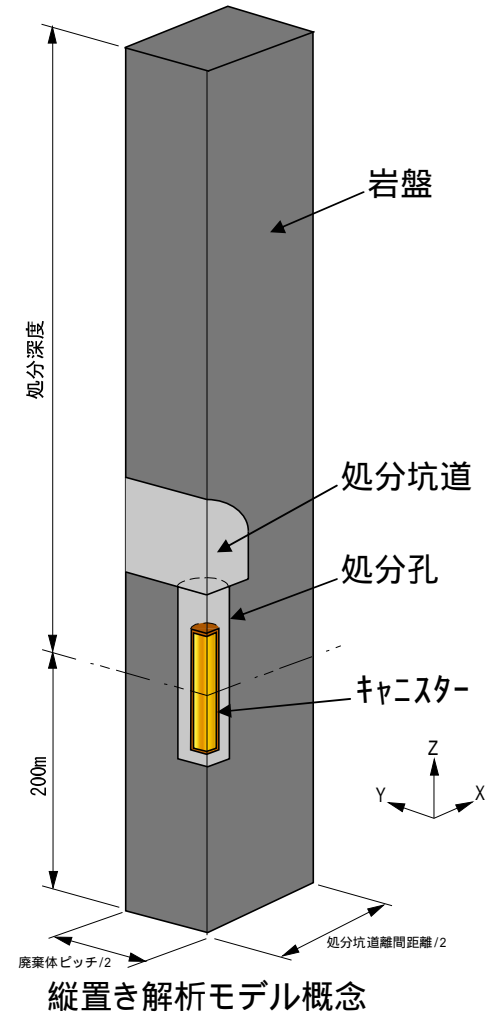
- 地表から処分深度(キャニスター中心) + 200m
- キャニスター1本が占める領域の1/4を三次元モデル化(右図参照)

境界条件, 初期条件

- モデル側面は断熱境界(隣接するキャニスターを考慮)
- 地表温度15 の固定境界
- 地温勾配3 /100mとして, 軟岩では地表-700m: 36 , 硬岩では地表-1200m:51 の固定境界

解析コード

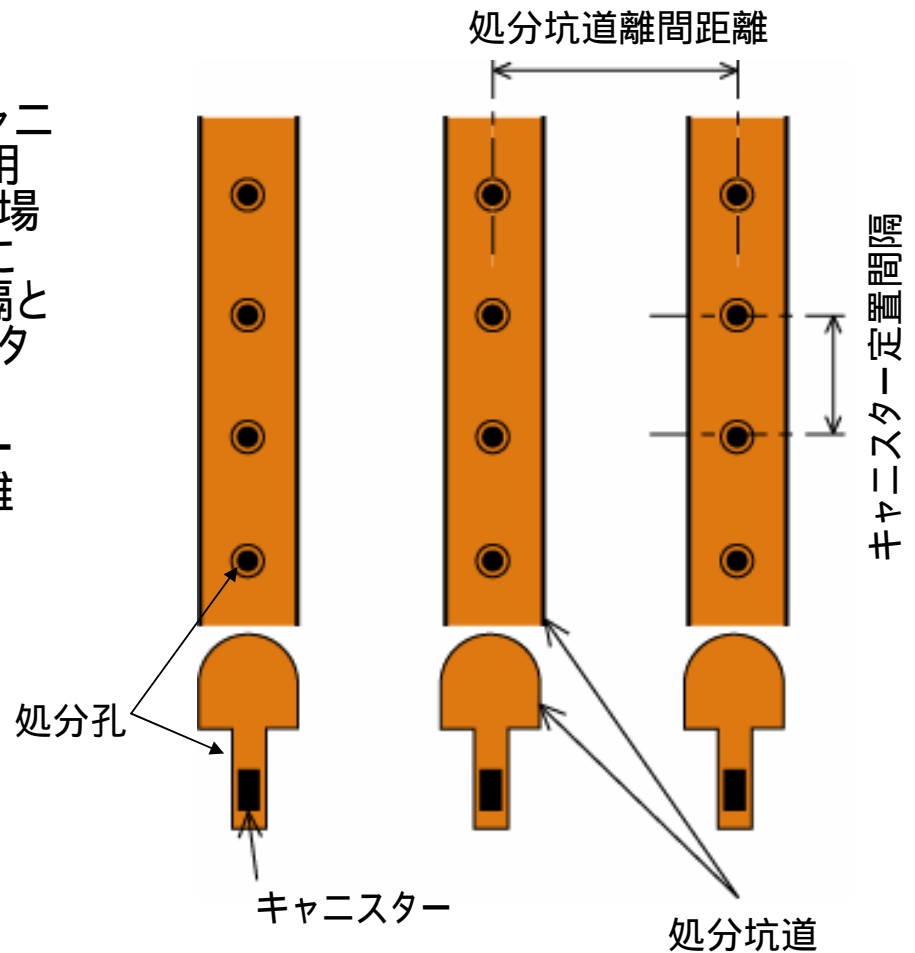
- 有限要素法汎用解析コード: ABAQUS 6.2



解析ケース

解析は、軟岩及び硬岩、キャニスター縦置き及び横置き、使用済燃料収納数4本及び2本の場合のそれぞれの組み合わせにおいて、キャニスター定置間隔と処分坑道離間距離をパラメータとして実施した。

縦置きの場合のキャニスター定置間隔と処分坑道離間距離の概念を右図に示す。



縦置き定置概念

熱物性値

解析で用いた熱物性値

	熱伝導率 W/m	比熱 KJ/kg	密度 Kg/m ³
キャニスター-(炭素鋼)*	51.6	0.47	7860
緩衝材* (含水比7%, 乾燥密度1600kg/m ³ , Sand30%)	0.78	0.59	1712
埋め戻し材**	1.3	1.0	1800
コンクリート支保(軟岩)**	1.4	0.879	2300
軟岩*	2.2	1.4	2200
硬岩*	2.8	1.0	2670

*核燃料サイクル開発機構(1999):わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性
- 地層処分研究開発第2次取りまとめ - 分冊2 地層処分の工学技術, JNC TN1400 99-022.

**財団法人電力中央研究所・電気事業連合会(1999):高レベル放射性廃棄物地層処分の事業化技術,
平成11年3月

熱伝導方程式

熱解析で用いる三次元熱伝導方程式を下に示す。

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q$$

c ; 比熱, ρ ; 密度, λ ; 熱伝導率
 T ; 温度, Q ; 流入熱量

緩衝材制限温度(100)に対する設計上の裕度について

「緩衝材制限温度(100)に対する設計上の裕度をどの程度設けることが適当か」に関し、

使用済燃料の燃焼度の不均質性

キャニスタ - と緩衝材の隙間の影響

の点から検討を行う。

1. 使用済燃料の燃焼度の不均質性の考慮

ガラス固化体と使用済燃料の発熱特性の違いは、前者がガラス固化工程を経て熱的に均質な状態であるのに対して、後者は集合体単位及び集合体軸方向の燃焼度に不均質性をもつことである。

軸方向の燃焼度分布について

使用済燃料は軸方向に燃焼度分布を持つため、発熱量も軸方向に分布する(図1及び図2参照)。PWR燃料及びBWR燃料の軸方向の発熱量分布を考慮した熱解析を実施した結果によれば、その影響は、それぞれ約0.9 、約1.5 程度である(図3及び図4参照)。

取出燃焼度の違いについて

現在、許認可上の最高取出燃焼度は、PWR、BWRともに、最大値で55GWD/MTUであるが、その際の平均取出燃焼度は、PWRで50GWD/MTU、BWRで45GWD/MTU(50GWD/MTUに増加させる計画あり)である。

許認可上の最高取出燃焼度に近い使用済燃料が発生するのは希であり、また、処分には、廃棄体内の使用済燃料の取出燃焼度を平均化するように、取出燃焼度の低いものと高いものを組み合わせることも可能であるが、今後高燃焼度化が進むことも想定される。

よって、設計上考慮すべき取出燃焼度の上限としては、50GWD/MTU程度を想定しておけば、集合体の組み合わせも柔軟に対応可能と考える。

図5に、取出燃焼度のばらつきを考慮した熱解析結果を示す。それによると、標準ケース(PWR取出燃焼度45 GWD/MTU)に対して、取出燃焼度50WD/MTUではPWRのケースで約8%、BWRのケースで約4%緩衝材の最高温度が高くなった。

設計上の裕度について

上記の軸方向の燃焼度分布及びの取出燃焼度のばらつきを考慮して、緩衝材制限温度(100℃)に対して、熱解析の結果に10%の裕度を見込むことが適切である。

2. キャニスターと緩衝材の隙間の影響

今回の直接処分場の熱解析においては、簡便化のために、キャニスターと緩衝材との隙間の影響までを織り込んだ検討は行っていない。

ただし、参考までに、隙間の影響を考慮したガラス固化体の熱解析によれば、隙間にベントナイト粉末を施工するとした場合()、保守的な仮定の下で約4の温度上昇が発生する。しかし、緩衝材定置後には徐々に地下水が浸潤し、緩衝材膨潤により隙間がふさがることも想定され、この地下水浸潤やそれに伴う応力の変化までも考慮した熱 - 水 - 応力連成解析によれば、熱解析のみの場合に比べ3~15 程度最高温度が下がることが示されている。これらのことから、今回の直接処分場の熱解析においても、ベントナイト粉末を施工するとすれば、キャニスターと緩衝材との隙間の影響は顕著ではないものと考えられる。

なお、処分体横置きの場合には、縦置きの場合に比べ、隙間へのベントナイト粉末の充填作業の困難さが予想される。

ガラス固化体の場合に、緩衝材大型試験設備を用いた人工バリア施工試験で、オーバーパック(キャニスターに相当)と緩衝材との隙間にベントナイト粉末を施工できることを確認(縦置きのみ)している。

緩衝材の設計目標温度

以上より、緩衝材制限温度100 を担保するため、燃焼度のばらつきを考慮し、緩衝材設計目標温度は90 とする。

図1. 代表的なPWR燃料の発熱分布(炉取出54年後)

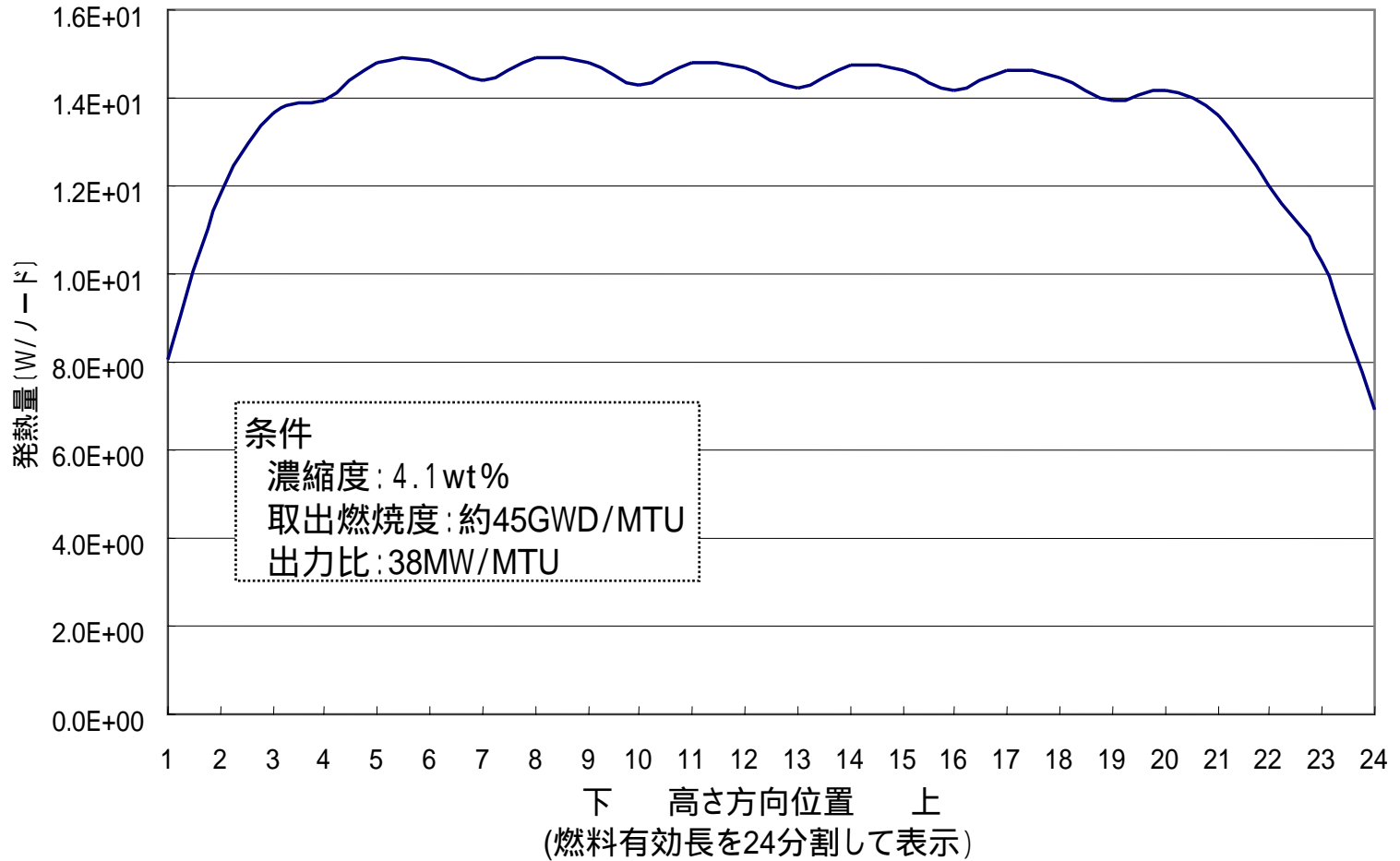


図2 . 代表的なBWR燃料の発熱分布(炉取出54年後)

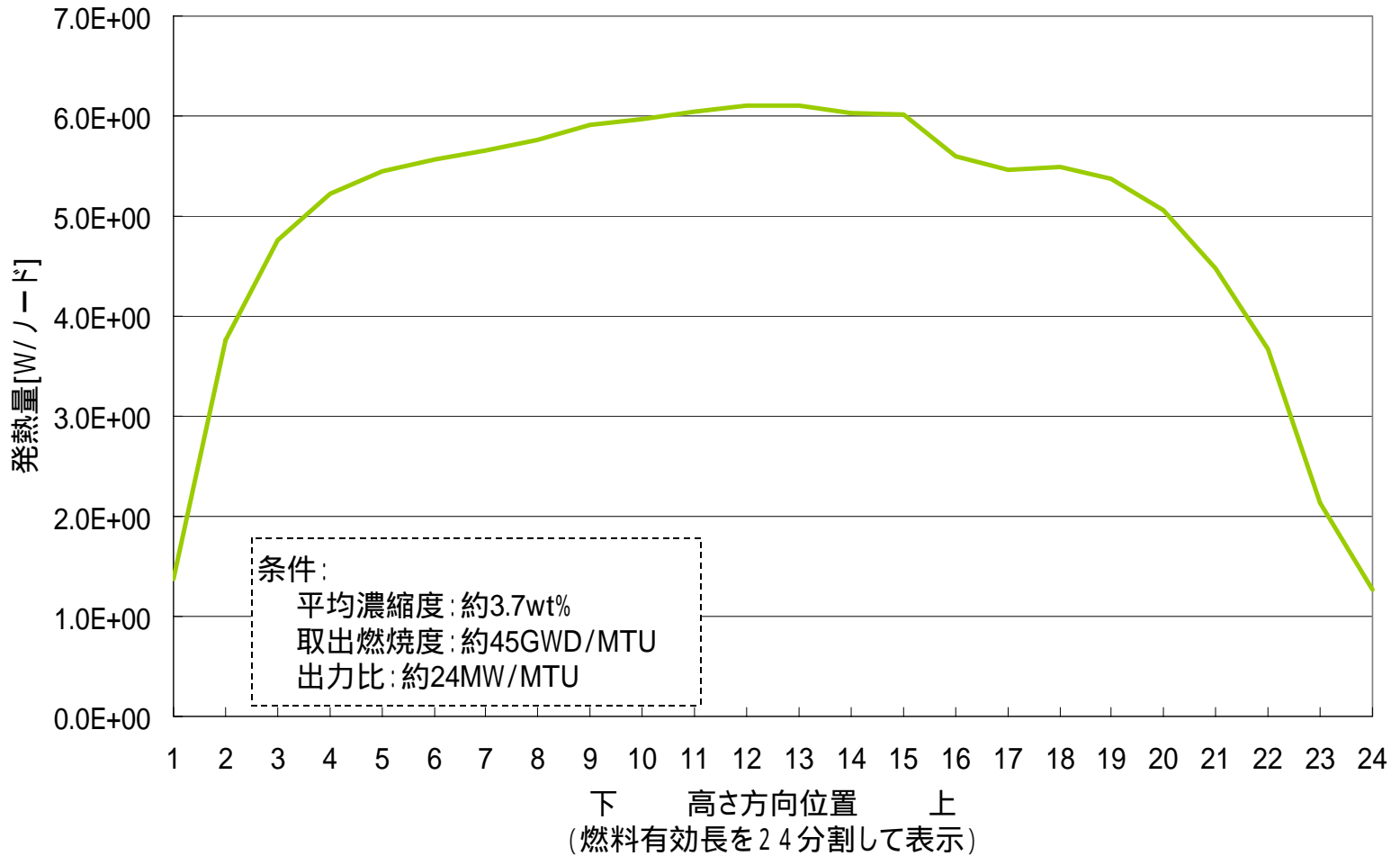


図3 . 燃烧度の軸方向分布の影響 (PWR)

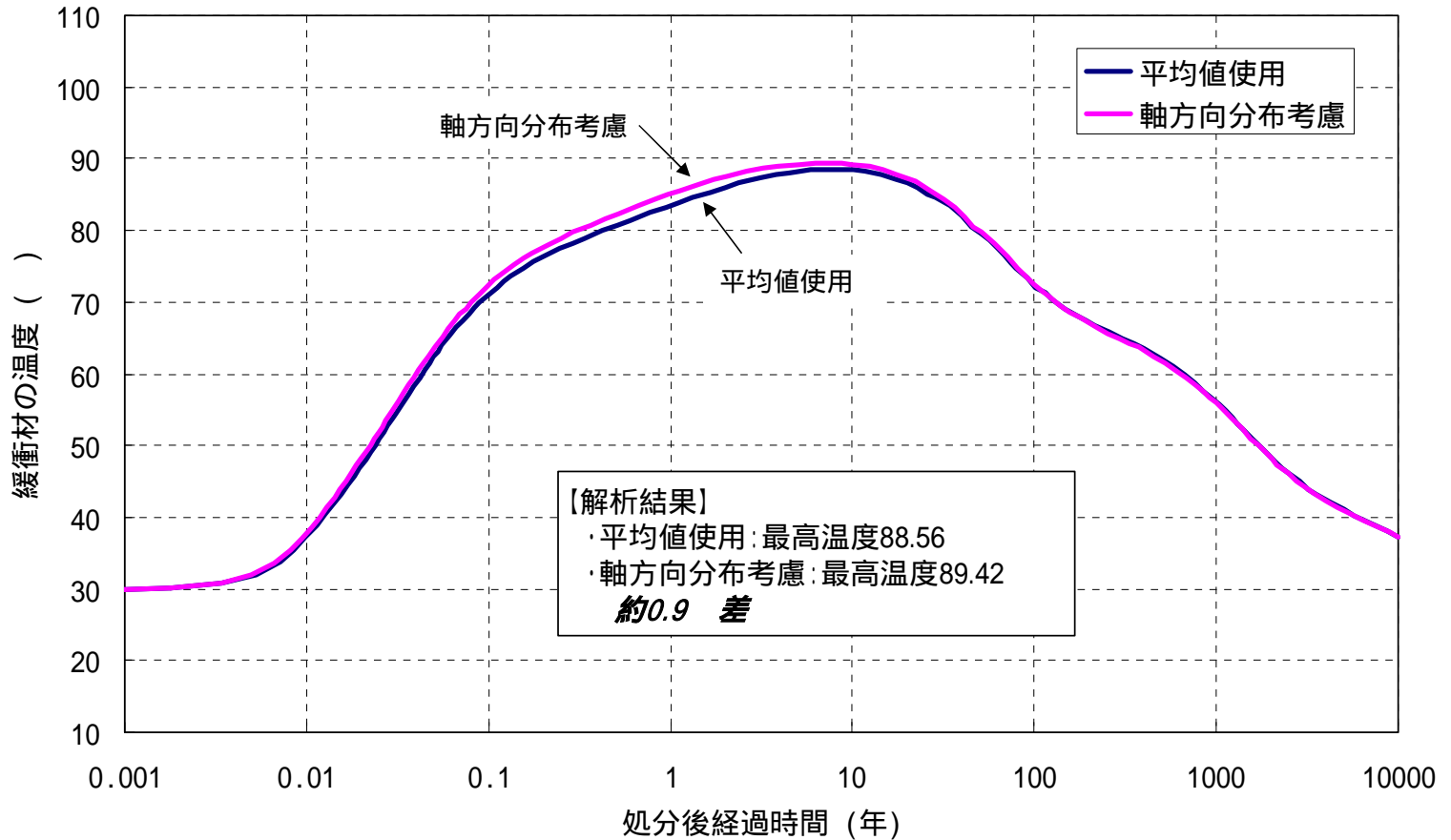


図4 . 燃烧度の軸方向分布の影響 (BWR)

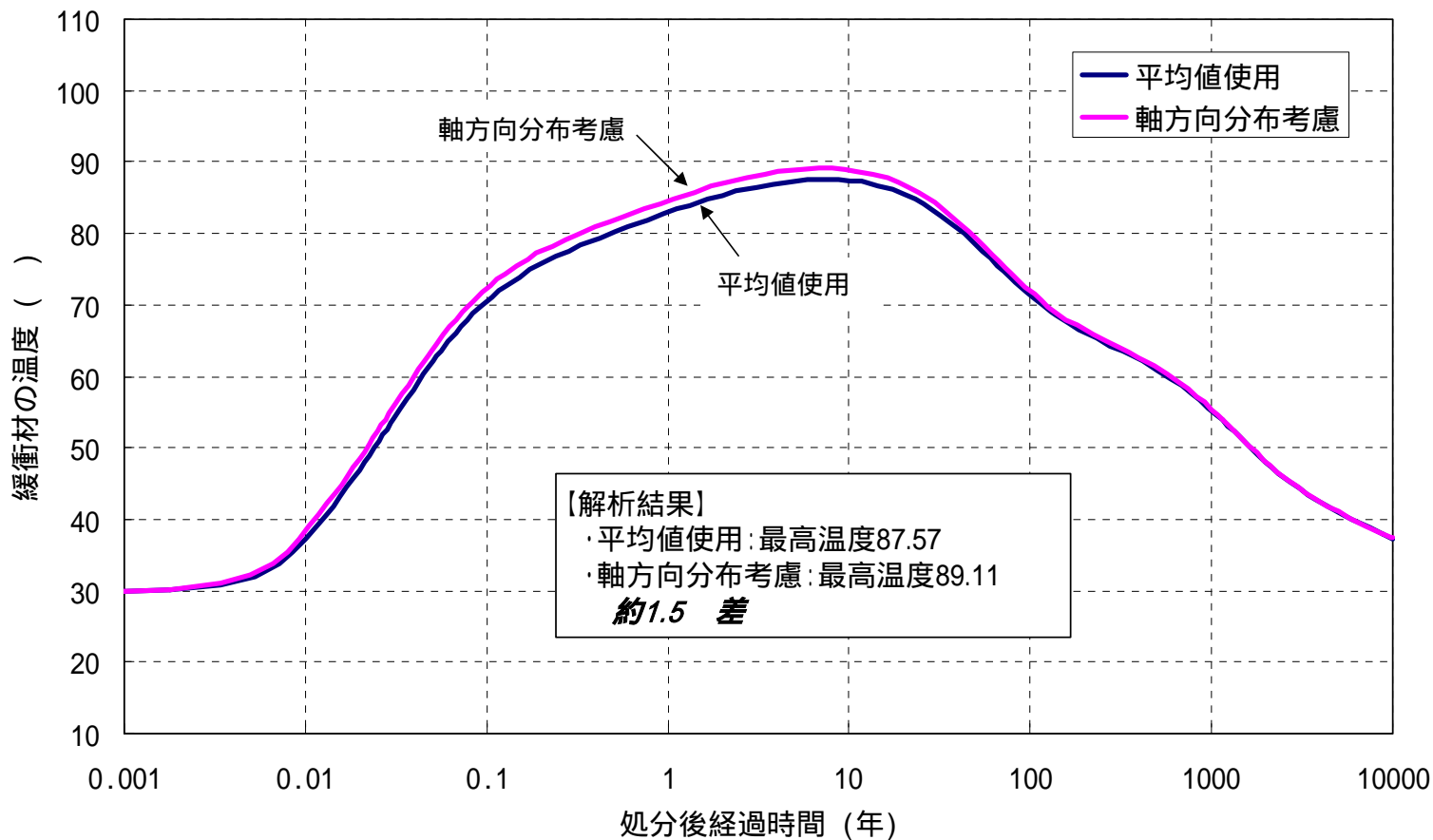
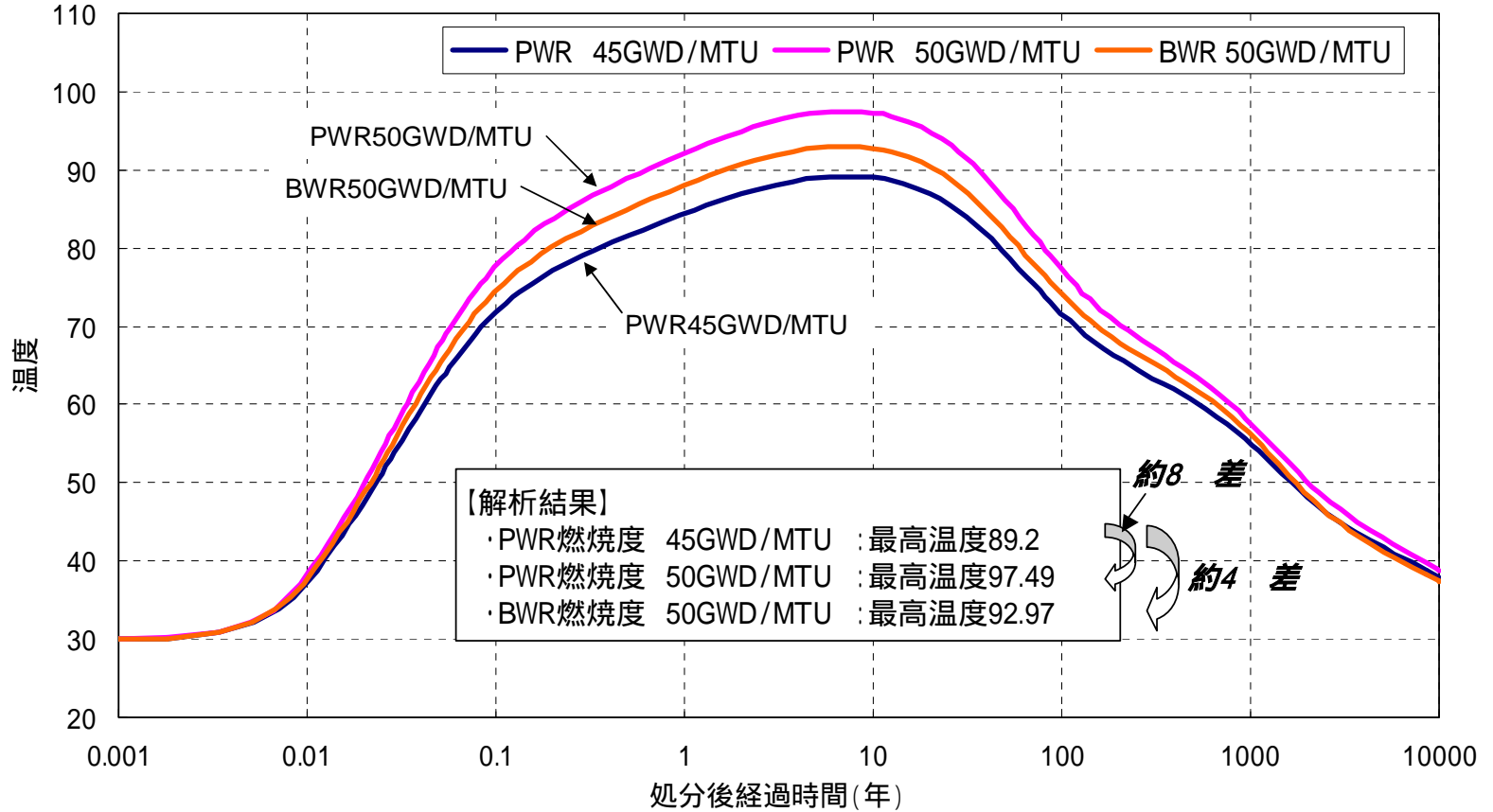


図5 . 取出燃烧度の違いが及ぼす影響



(参考) 直接処分における 緩衝材制限温度と設計温度(諸外国の例)

項目 \ 国	フィンランド	スウェーデン	スイス
使用済燃料燃焼度 冷却期間	36 GWD/MTU 30年	42 ~ 44 GWD/MTU 30年	48 GWD/MTU (30 ~ 65GWD/MTU) 40年
処分場深度 岩種	500m 花崗岩	500 ~ 600m 花崗岩等	約650m オパリナス粘土
緩衝材制限温度 ()	100	100	125 (外側半分)
緩衝材設計目標温度の考え方	岩盤等の熱特性のばらつきを考慮して10の裕度を設定 90 と設定	使用済燃料等の特性のばらつきを考慮して10の裕度を設定 キャニスター、ベントナイト間ギャップを考慮して10の裕度を設定 80 と設定	緩衝材の外側半分が125を越えないことを条件として設定 ガラス固化体は使用済燃料と同じレイアウトに設定
文献	・Vieno and Nordman (1999) : POSIVA 99-07 ・Ikonen (2003) : POSIVA 2003-11	・Ageskog and Jansson (1999) : SKB Technical Report, TR-99-02	Nagra (2002) : Technical Report 02-05

熱解析計算結果

処分場地下施設の設定（熱解析結果のまとめ）

岩種	ケース設定	燃料集合体数	サイト数	定置方式	燃料種類/量	緩衝材温度 ()	キャニスター (廃棄体) 定置間隔 (m)	処分坑道 離間距離 (m)	力学の制限 ¹		決定因子	専有面積 (m ² /tU)
									キャニスター (廃棄体) 定置間隔 (m)	処分坑道 離間距離 (m)		
軟岩	ケース1	2	1	縦置	PWR/0.92tU	67.8	8	24	7.596 (3d ₁)	23.66 (2.6D ₁)	力学	208.7
	ケース2	4	1	縦置	PWR/1.84tU	90	10	32	8.232 (3d ₂)	23.66 (2.6D ₁)	熱	173.9
	ケース3	2	2	縦置	PWR/0.92tU	67.8	8	24	7.596 (3d ₁)	23.66 (2.6D ₁)	力学	208.7
	補足検討（横置） ケース1	2	1	横置	PWR/0.92tU	90	7	12	6.08 ²	6.33 (2.5D ₂)	熱	91.3
	補足検討（横置） ケース2	4	1	横置	PWR/1.84tU	90	10	31	6.08 ²	6.86 (2.5D ₃)	熱	168.5
硬岩	ケース1	2	1	縦置	PWR/0.92tU	90	6	21	5.064 (2d ₁)	12.9 (2D ₄)	熱	137.0
	ケース2	4	1	縦置	PWR/1.84tU	- (95)	- (20)	- (30)	- {5.488(2d ₂)}	- {12.9(2D ₄)}	熱	- (326.1)
	ケース3	2	2	縦置	PWR/0.92tU	90	6	21	5.064 (2d ₁)	12.9 (2D ₄)	熱	137.0
	補足検討（横置） ケース1	2	1	横置	PWR/0.92tU	90	7	17	6.16 ²	5.064 (2D ₂)	熱	129.3
	補足検討（横置） ケース2	4	1	横置	PWR/1.84tU	- (95)	- (20)	- (30)	- (6.16 ²)	- {5.488(2D ₃)}	熱	- (326.1)
軟岩	ガラス-1 ³	-	-	縦置	ガラス固化体 /0.8tU	71	7.5	12	7.5	12	力学	112.5
硬岩	ガラス-2 ³	-	-	縦置	ガラス固化体 /0.8tU	98	4.7	10	4.7	10	力学	58.8

1 核燃料サイクル開発機構(1999)：わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性 - 地層処分研究開発第2次取りまとめ - 分冊2

2 人工バリアの仕様により決定される値

3 新計画策定会議技術検討小委員会資料，参考資料 高レベル放射性廃棄物処分費用の見積りにおける各項目の絞込み等についての検討（2004年8月31日）

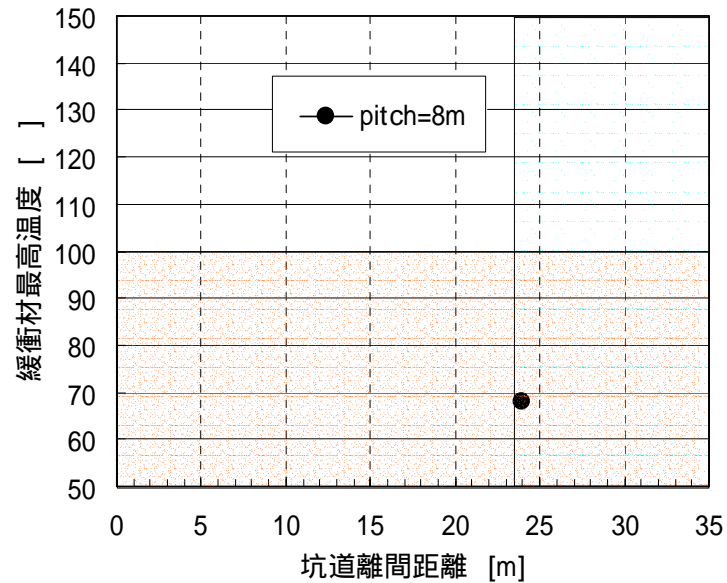
d：処分孔径（d₁=2.532, d₂=2.744）

D：処分坑道径（D₁=9.100, D₂=2.532, D₃=2.744, D₄=6.450）

キャニスター定置間隔および坑道離間距離の熱解析結果 (軟岩ケース1、3)

岩種	定置方式	燃料集合体数	ピッチ	坑道離間距離
軟岩	縦置	2	8m	24m

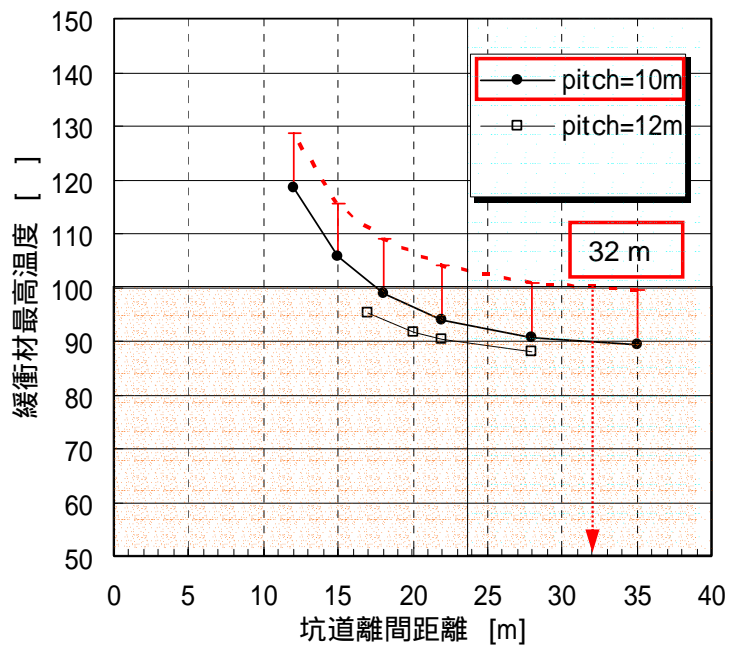
坑道の力学的安定値からの制限
 pitch 7.596
 坑道離間距離 23.66



キャニスター定置間隔および坑道離間距離の熱解析結果（軟岩ケース2）

岩種	定置方式	燃料集合体数	ピッチ	坑道離間距離
軟岩	縦置	4	10m	32m

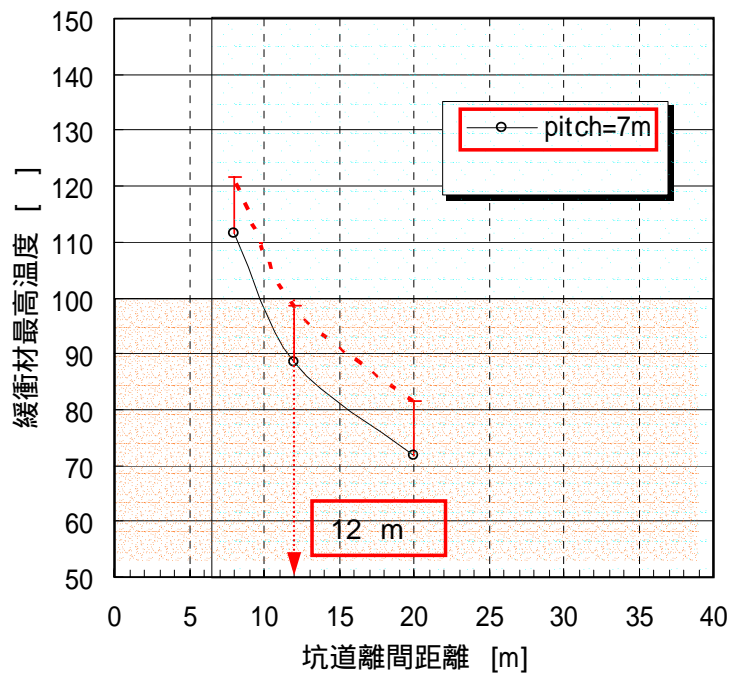
坑道の力学的安定値からの制限
 pitch 8.232
 坑道離間距離 23.66



キャニスター定置間隔および坑道離間距離の熱解析結果(軟岩補足検討(横置)ケース1)

岩種	定置方式	燃料集合体数	ピッチ	坑道離間距離
軟岩	横置	2	7m	12m

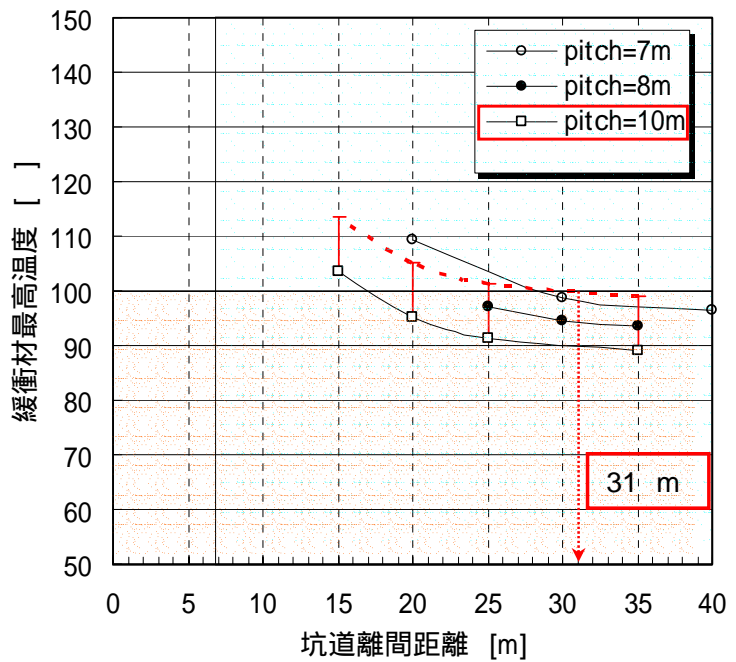
坑道の力学的安定値等からの制限
 pitch 6.08 (人工バリア仕様より決定)
 坑道離間距離 6.33



キャニスター定置間隔および坑道離間距離の熱解析結果 (軟岩補足検討(横置)ケース2)

岩種	定置方式	燃料集合体数	ピッチ	坑道離間距離
軟岩	横置	4	10m	31m

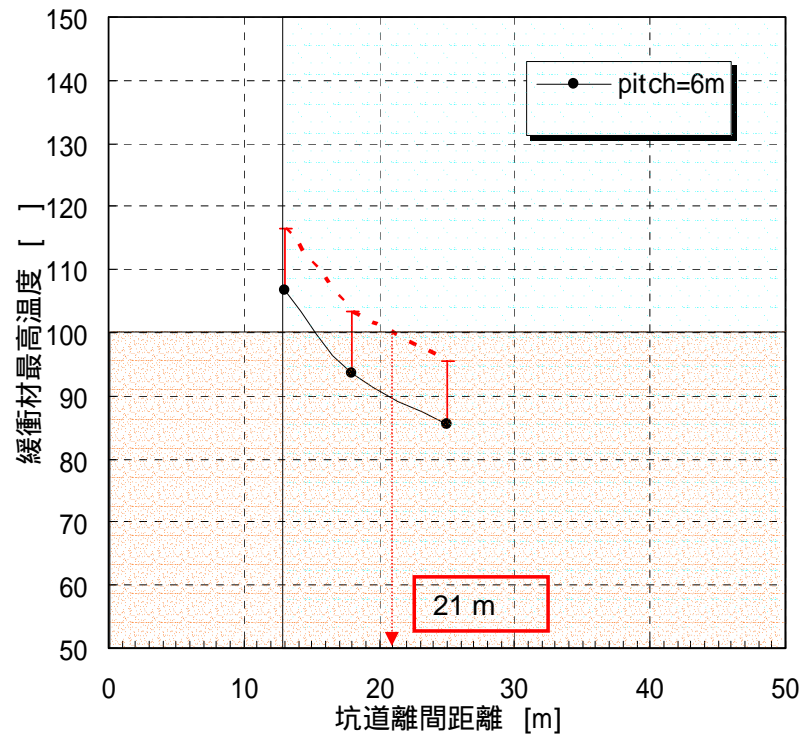
坑道の力学的安定値等からの制限
 pitch 6.08 (人工バリア仕様より決定)
 坑道離間距離 6.86



キャニスター定置間隔および坑道離間距離の熱解析結果（硬岩ケース1、3）

岩種	定置方式	燃料集合体数	ピッチ	坑道離間距離
硬岩	縦置	2	6m	21m

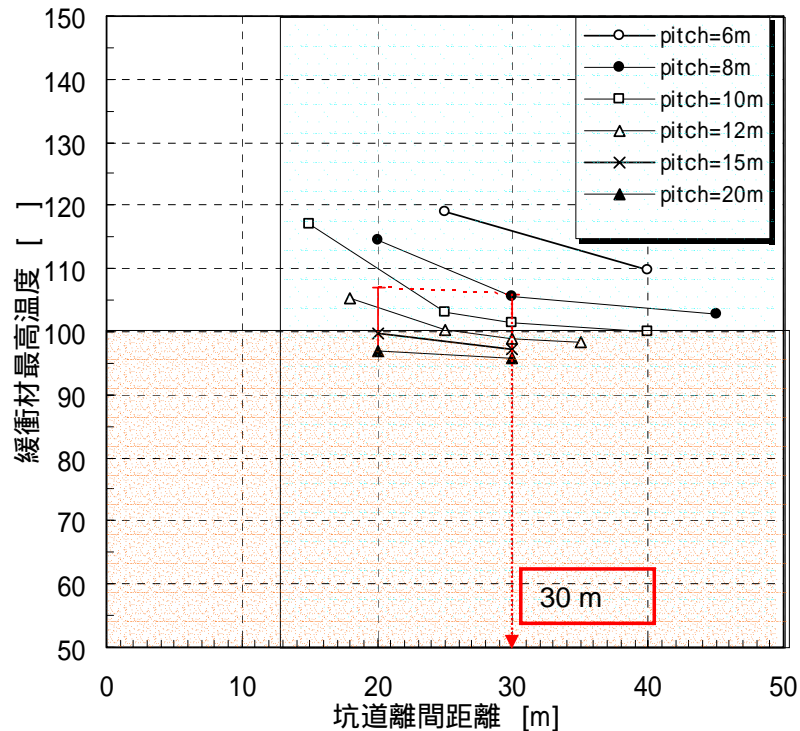
坑道の力学的安定値からの制限
 pitch 5.064
 坑道離間距離 12.9



キャニスター定置間隔および坑道離間距離の熱解析結果(硬岩ケース2)

岩種	定置方式	燃料集合体数	ピッチ	坑道離間距離
硬岩	縦置	4	(20m)	(30m)

坑道の力学的安定値からの制限
 pitch 5.488 m
 坑道離間距離 12.9 m



温度制限に対する目標値(90℃)を満たさない。
 ピッチ及び坑道間距離は温度が下げ止まる95℃の場合を表現。

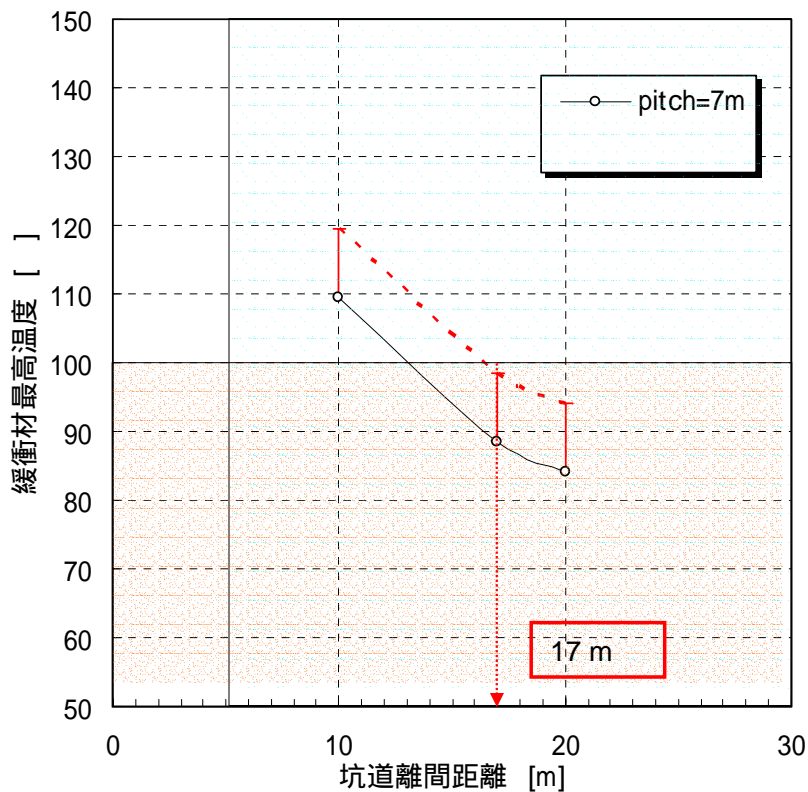
キャニスター定置間隔および坑道離間距離の熱解析結果(硬岩補足検討(横置)ケース1)

岩種	定置方式	燃料集合体数	ピッチ	坑道離間距離
硬岩	横置	2	7m	17m

坑道の力学的安定値等からの制限

pitch 6.16 m(人工バリア仕様より決定)

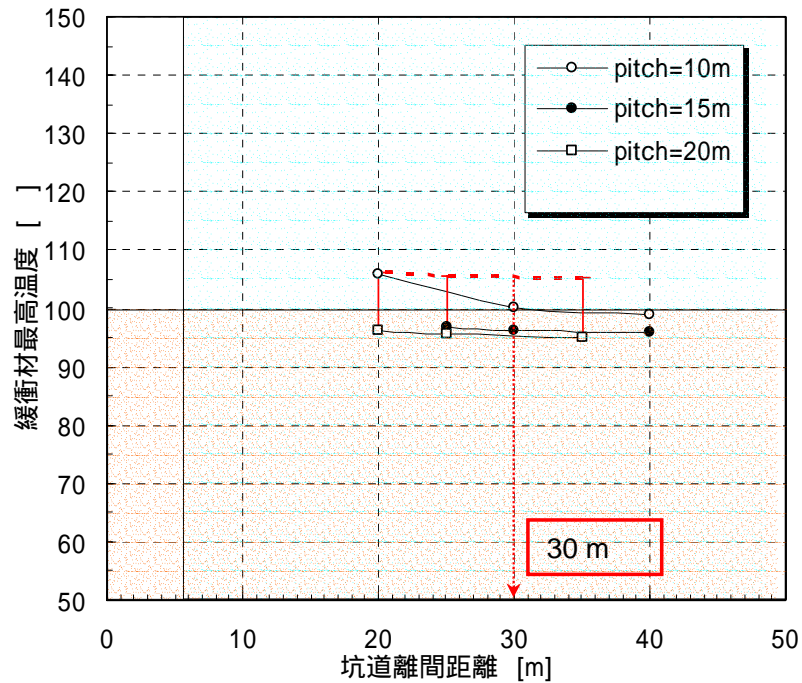
坑道離間距離 5.064m



キャニスター定置間隔および坑道離間距離の決定根拠 (硬岩補足検討(横置)ケース2)

岩種	定置方式	燃料集合体数	ピッチ	坑道離間距離
硬岩	横置	4	(20m)	(30m)

力学的安定値等からの制限
 pitch 6.16(人工バリア仕様より決定)
 坑道離間距離 5.488



温度制限に対する目標値(90°C)を満たさない。
 ピッチ及び坑道間距離は温度が下げ止まる95°Cの場合を表現。

各国における専有面積に関する設計比較

国	燃料1トン当たりに必要な 専有面積(文献からの換算値)		処分までの 冷却期間	岩種 深度 地温 定置方式	熱設計条件	備考
	直接処分	ガラス固化体				
ベルギー ¹⁾	267.5m ² /tU	46.1m ² /tU	HLW: 50年 SF: 40~60年 (面積は60年で設定)	ブーム粘土 230m 16 横置き	・新第3紀帯水層の最大上昇 温度を6 (これが最も厳しい条件を付与) ・埋め戻し材が100 以下 ・生物圏における最大上昇 温度を0.5	・直接処分場には, 使用済燃料 4,230tU以外にガラス固化体420 本(630tU)も処分する。 ・ガラス固化体処分場では, 3,920 本(4,860tU)を処分する。
スウェーデン ^{2,3)}	117.6m ² /tU	-	30年	花崗岩等 500~600m 11~16 縦置き	キャニスター表面温度が 100 以下	
フィンランド ^{4,5)}	100m ² /tU	-	30年	花崗岩 500m 10 縦置き	キャニスター/緩衝材境界が 100 以下	
スイス ⁶⁾	195m ² /tIHM*	122m ² /tIHM*	40年 (MOXは55年)	オパリナス粘土 650m 38 横置き	緩衝材の外側半分が125 以下	・使用済燃料は, 2,065本 (4,860tIHM)を処分する。 ・ガラス固化体処分は, 730本 (1,195tIHM)を処分する。

出典

- 1)ONDRAF/NIRAS: Technical overview of the SAFIR 2 report, NIROND 2001-05E, 2001
- 2)SKB: Waste, repository design and sites, TR-99-08, 1999
- 3)Ageskog and Jansson: Heat propagation in and around the deep repository, TR-99-02, 1999
- 4)POSIVA: Safety assessment of spent fuel disposal in Hastholmen, Kivetty, Olkiluoto and Romuvaara - TILA-99, POSIVA 99-07, 1999
- 5)Ikonen: Thermal Analyses of KBS-3H Type Repository, POSIVA 2003-11, 2003
- 6)Nagra: Entsorgungsnachweis Project NTB 02-05, 2002.

*tIHM: 初期重金属tonを表しており, 燃料集合体内のUまたはU+Puの初期量を表す。

2. 処分場パネル設計

パネル設定の考え方

パネル数:

ガラス固化体の例を参考に軟岩:8パネル,硬岩:6パネルと設定

なお、坑道内管理温度(30℃:鉱山保安規則に基づく設計温度)を満足するためのパネル数と坑道内換気量の関係を計算。パネル当りのキャニスター発熱量(本数)、坑内管理温度や坑道断面積等より、必要換気量、坑内風速を関係式より算出し、上記設定が風速基準値(7.5m/s以下:鉱山保安規則)を満たすことを確認。

関係式 $Q = H / (\rho \cdot C (T_a - T_o))$

Q:換気量, H:発熱量, ρ :空気の密度, C:空気の比熱

T_a:坑内管理温度, T_o:外気温度

主要/処分坑道の取り合い:(次頁の「[図パネル設定の概要と留意点](#)」参照)

隣接する処分坑道が主要坑道との取り付け部分で交差しないように、取り付け角度を検討。ガラス固化体での検討を参考に設定。[設定:軟岩120°,硬岩120°]

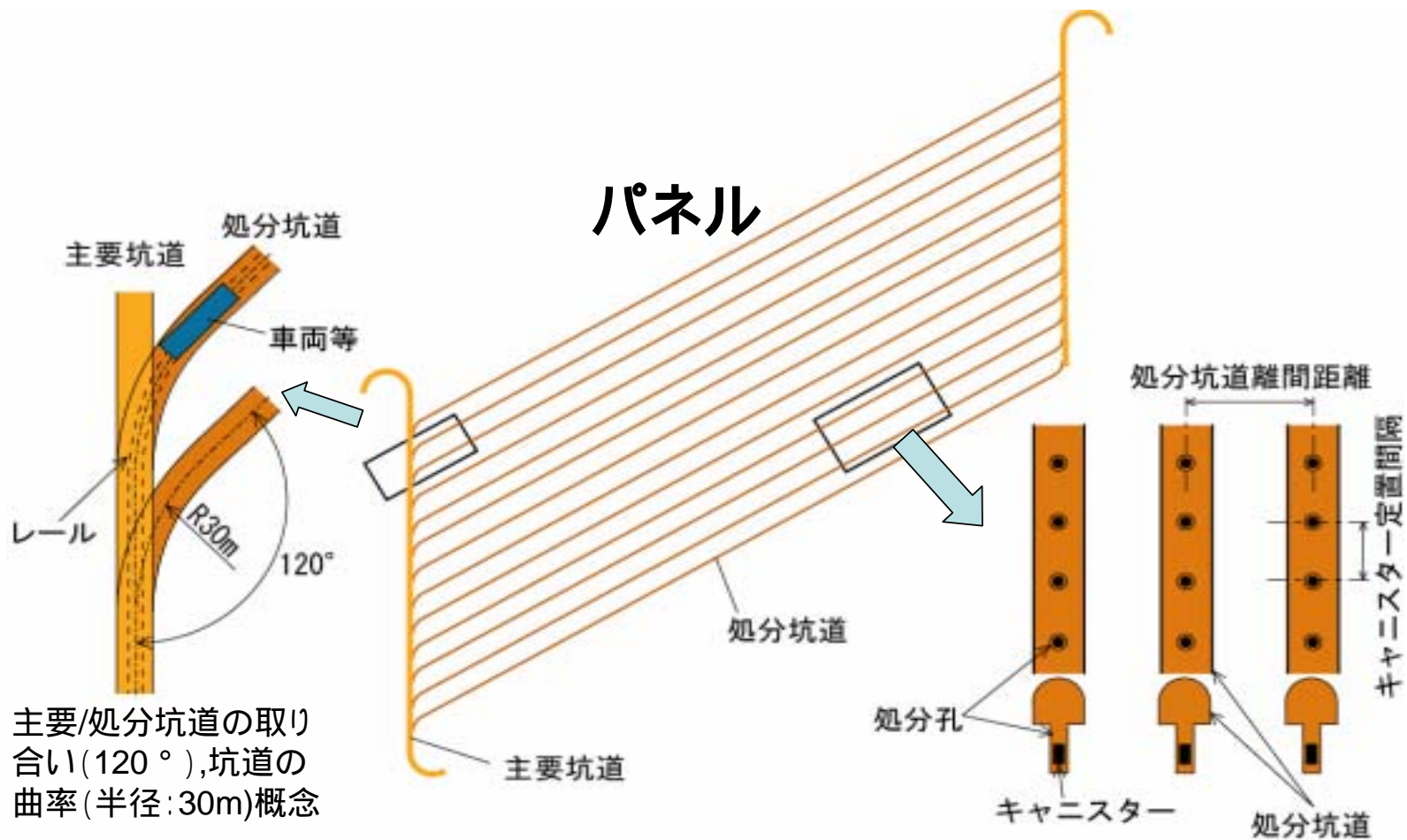
パネル当りの坑道数:

パネルを左右に配置した時の片側のパネル全体の縦横比(レイアウト図参照)を概ね1:1となるように処分坑道数を設定。[設定:レイアウト図参照]

坑道の曲率(半径):(次頁の「[図パネル設定の概要と留意点](#)」参照)

主要坑道から処分坑道への取り付け部分等での坑道の曲率(半径)は、搬送定置設備の仕様より設定。[設定:R=30m]

図. パネル設定の概要と留意点

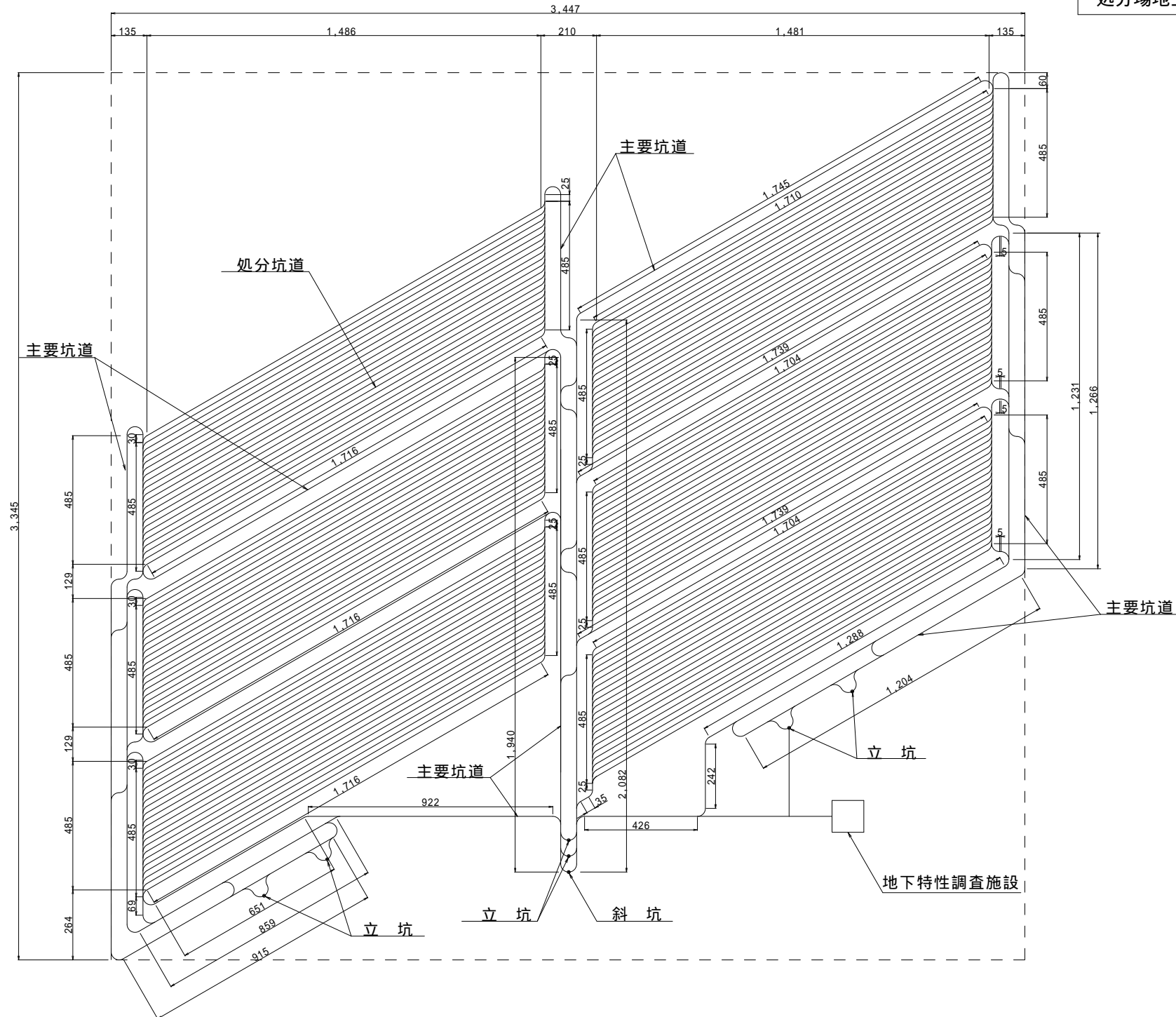


主要/処分坑道の取り
合い(120°),坑道の
曲率(半径:30m)概念

縦置き定置概念例

使用済燃料処分場レイアウト例

ケース名	硬岩ケース1
キャニスター定置間隔 (m)	6
処分坑道離間距離 (m)	21
処分場地上面積 (km ²)	11.5



各ケースの処分場寸法

岩種	ケース設定	燃料 集合体数	サイト数	緩衝材温度 ()	定置方式	キャニスター 定置間隔 (m)	処分坑道 離間距離 (m)	間隔の決定 因子	処分場寸法		
									横長(km)	縦長(km)	面積(km ²)
軟岩	ケース1	2	1	67.8	縦置	8	24	力学	4.1	4.2	17.4
	ケース2	4	1	90	縦置	10	32	熱	3.7	3.8	14.2
	ケース3	2	2	67.8	縦置	8	24	力学	3.1	3.0	9.4 (1サイト分)
	補足検討(横置) ケース1	2	1	90	横置	7	12	熱	3.1	2.9	9.1
	補足検討(横置) ケース2	4	1	90	横置	10	31	熱	3.7	3.8	14.0
硬岩	ケース1	2	1	90	縦置	6	21	熱	3.4	3.3	11.5
	ケース2	4	1	- (95)	縦置	- (20)	- (30)	熱	- (8.9)	- (6.2)	- (55.5)
	ケース3	2	2	90	縦置	6	21	熱	2.6	2.4	6.2 (1サイト分)
	補足検討(横置) ケース1	2	1	90	横置	7	17	熱	3.4	3.3	11.1
	補足検討(横置) ケース2	4	1	- (95)	横置	- (20)	- (30)	熱	- (8.9)	- (6.2)	- (55.5)