

特定廃棄物管理施設のガラス固化体貯蔵建屋 B 棟及  
び再処理施設においてガラス固化体を貯蔵する類似  
の冷却構造を有する設備における崩壊熱の除去解析  
の再評価結果報告書

平成 17 年 1 月 28 日

日本原燃株式会社

## 目 次

1 . はじめに	1
2 . 崩壊熱の除去解析の再評価結果	1
2 . 1 クロスチェック解析において差違の認められた EB2 建屋の再評価	1
2 . 1 . 1 設備及び解析の概要	1
2 . 1 . 2 冷却空気流量の再解析	1
2 . 1 . 3 伝熱の再解析と再評価の結果	2
2 . 2 類似の冷却構造を有する KA 建屋、KBE 建屋及び KBW 建屋 の再評価	3
3 . 崩壊熱の除去性能を確保するための対策	3
3 . 1 対策の方針	3
3 . 2 構造変更に係る検討事項	3
3 . 3 構造変更内容の妥当性確認	4
3 . 4 今後の進め方	4
4 . 崩壊熱の除去解析の誤りの原因	5
4 . 1 発生事象	5
4 . 2 原因	6
5 . 設工認で使用した計算式及び解析コードの確認	6
6 . 再発防止対策	7

添付 1 圧力損失計算において文献式の解釈誤りの発生に至った経緯

## 1. はじめに

平成 17 年 1 月 14 日、原子力安全・保安院から、当社に、「日本原燃株式会社特定廃棄物管理施設の変更に係る設計及び工事の方法の認可申請について（指示）」の文書をいただいた。

上記文書の指示に従い、特定廃棄物管理施設の「ガラス固化体貯蔵建屋 B 棟」（以下「EB2 建屋」という。）並びに、再処理施設の「高レベル廃液ガラス固化建屋」（以下「KA 建屋」という。）、「第 1 ガラス固化体貯蔵建屋・東棟」（以下「KBE 建屋」という。）及び「第 1 ガラス固化体貯蔵建屋・西棟」（以下「KBW 建屋」という。）について、崩壊熱の除去解析の再評価を行った。その結果について報告する。再評価を行った設備の一覧を表 1 に示す。

## 2. 崩壊熱の除去解析の再評価結果

### 2.1 クロスチェック解析において差違の認められた EB2 建屋の再評価

#### 2.1.1 設備及び解析の概要

EB2 建屋のガラス固化体貯蔵設備の冷却空気流路の概略断面図を図 1 に示す。

ガラス固化体の冷却には、ガラス固化体の崩壊熱により暖められた空気が軽くなることにより上方へ移動する力（通風力）を用いた間接自然空冷方式を採用している。冷却空気は、冷却空気入口シャフトから流入し放射線しゃへいのために設けられている入口迷路板部、下部プレナム部を通り、ガラス固化体を収納した収納管と通風管の間の円環流路を流れ、ガラス固化体を冷却するとともに側壁流路を流れ側壁のコンクリートを冷却する。ガラス固化体の崩壊熱により暖められた冷却空気は、上部プレナム部、入口迷路板部と同様の目的で設置された出口迷路板部を通り、冷却空気出口シャフトから建屋外へ出る。

崩壊熱の除去解析は、冷却空気流量の解析と、その解析結果を受けて行う伝熱解析からなる。崩壊熱の除去解析フローを図 2 に示す。

冷却空気流量については、ガラス固化体の崩壊熱によって発生する通風力と冷却空気流路の圧力損失のバランスにより求める。

この冷却空気流量とガラス固化体の発熱量、ガラス固化体貯蔵設備の形状、熱物性値等から伝熱解析を行い、ガラス固化体及び各部のコンクリートの温度を求める。

今回、冷却空気流量の再解析結果をもとに伝熱の再解析を行うことにより、崩壊熱の除去解析の再評価を行った。

#### 2.1.2 冷却空気流量の再解析

EB2 建屋で実施していた崩壊熱の除去解析結果について調査した結果、迷路

板部の圧力損失計算の際に文献式<sup>1)</sup>の解釈を誤り、迷路板部の圧力損失を過小評価していたことが分かった。(詳細は「4. 崩壊熱の除去解析の誤りの原因」参照)

このため、迷路板部の圧力損失計算において、文献式<sup>1)</sup>を正しく適用して、崩壊熱の除去性能を再解析することとした。

冷却空気流量は、冷却空気流量を計算するプログラムを使用して、円環流路、出口シャフト部等の通風力の合計と各部位の圧力損失の合計がバランスするように圧力損失及び流量をパラメータとした収束計算により求める。収束計算では、通風力と圧力損失をバランスさせるために流量を変化させるが、迷路板部の圧力損失が大きい場合には流量のわずかな変動に対して圧力損失が急激に変動するためにバランスさせることができず収束解が得られなかった。

このため、表2及び図3に示すように冷却空気流量の計算において全円環流路に同一流量が流れるとして、全通風力と圧力損失がバランスするまで少しずつパラメータを変化させ収束解を求めた。これを以下「簡易計算」という。簡易計算手法は、設計及び工事の方法の認可(以下「設工認」という。)と同様の解析フローであるが、側壁コンクリートの線による発熱及び側壁流路の冷却空気の流れについて無視している。

冷却空気流量が大きいほど迷路板部の圧力損失が大きくなり、円環流路に流れる冷却空気流量に与える影響が大きくなることから、今回の簡易計算では最も冷却空気流量が大きくなるガラス固化体を全数貯蔵した場合について評価を実施した。

圧力損失の計算結果を表3に示す。結果によると、入口迷路板部圧力損失については設工認の計算値の11Paが再計算では65Pa、出口迷路板部圧力損失については16Paが73Pa、円環流路及びその他の圧力損失を含めた合計では75Paが146Paとなり、迷路板部の圧力損失を過小評価していたことが分かった。この結果、円環流路1本当たりの冷却空気流量は、設工認の計算値の1,147kg/hが再計算では491kg/hとなった。

1) Report S-SS-3-9, Heat Transfer Research Inc.1987

## 2. 1. 3 伝熱の再解析と再評価の結果

簡易計算により得た冷却空気流量をもとに、設工認において用いている汎用有限要素法解析コード(ABAQUS)を用いて伝熱解析を実施した。

その結果のガラス固化体中心温度及びコンクリート温度を表3に示す。ガラス固化体中心温度は設計目標値の500であったが、コンクリート温度は当施設の設計目標値であるところの日本建築学会発行の「原子力用コンクリート格

納容器設計指針案・同解説」の中の通常運転時（長時間）のコンクリート温度制限値 65 を超えることが分かった。

以上のことから、本迷路板部の設計では、上記の当社設計目標値を満足できないと判断した。

## 2.2 類似の冷却構造を有する KA 建屋、KBE 建屋及び KBW 建屋の再評価

EB2 建屋と類似の冷却構造を有する KA 建屋、KBE 建屋及び KBW 建屋について調査した結果、EB2 建屋と同様に圧力損失計算において文献式<sup>1)</sup>の解釈に誤りがあり、迷路板部の圧力損失を過小評価していた。（詳細は「4. 崩壊熱の除去解析の誤りの原因」参照）

このため、EB2 建屋と同様の再評価を実施した。

再評価の結果、KA 建屋におけるガラス固化体中心温度は設計目標値の 500 以内に入っているが、KBE 建屋及び KBW 建屋におけるガラス固化体中心温度は設計目標値の 500 を超えることが分かった。コンクリート温度については、KA 建屋、KBE 建屋及び KBW 建屋とも、当施設の設計目標値である 65 を超えることが分かった。（表 3 参照）

以上のことから、本迷路板部の設計では、上記の当社設計目標値を満足できないと判断した。

## 3. 崩壊熱の除去性能を確保するための対策

### 3.1 対策の方針

再評価の結果、EB2 建屋、KA 建屋、KBE 建屋及び KBW 建屋について、当社の設計目標値を満足できず、崩壊熱の除去性能が確保できないことが判明したため、上記の 4 建屋の迷路板部の構造を変更する。変更にあたっては迷路板設置の目的であるしゃへい機能を満足するとともに崩壊熱の除去性能を確保できる構造へ変更する。

なお、構造変更にあたっては、「6. 再発防止対策」を踏まえて実施する。

### 3.2 構造変更に係る検討事項（図 4 参照）

#### (1) 冷却空気流量を確保するための圧力損失の低減

圧力損失の低減を図るために、迷路板の一部を削除し開口部を拡大する。

#### (2) しゃへい機能の確保

開口部を拡大した迷路板部のしゃへい機能を補うために、必要に応じて、拡大した開口部へ金属製ルーバーの設置、冷却空気入口及び出口シャフト部へのしゃへい板の設置を考慮する。

### (3) コンクリート温度の上昇防止

必要に応じてコンクリート部位に対して、断熱材を厚くする等を検討する。

これらの対策については、今後の設計の中で具体化し、併せて構造変更に伴う建物の健全性についても確認し、その結果に基づき 3.4 項に示すような設工認変更申請等を行う。

#### 3.3 構造変更内容の妥当性確認

構造を変更する迷路板部については、圧力損失の計算について、原理の異なる別の評価方法による確認としてモックアップ試験及び流体解析コードによる確認を実施し、設計の妥当性を確認する。

#### 3.4 今後の進め方（表 4 参照）

第 1 回設工認認可を受け、第 2 回設工認申請中である EB2 建屋については、第 1 回設工認変更申請及び第 2 回設工認申請書の一部補正を行う。

KA 建屋及び KBE 建屋については、設工認変更申請を行い認可を受けた後に、改造工事を実施する。なお、KA 建屋及び KBE 建屋の改造工事終了後に、ウラン試験の総合確認試験を実施する。

また、第 1 回設工認申請中である KBW 建屋については、第 1 回設工認申請書の一部補正を行う。

#### 4 . 崩壊熱の除去解析の誤りの原因

圧力損失計算において文献式<sup>1)</sup>の解釈誤りの発生に至った経緯を添付 1 に示す。

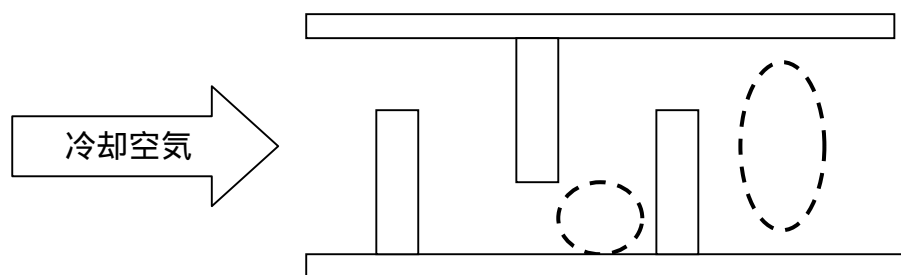
##### 4 . 1 発生事象

迷路板部を流れる冷却空気は、迷路板により流れを妨げられ、圧力を失うことで流量が低下する。一般に、冷却空気量は、迷路板部の流路が太いと空気が流れやすく、細いと流れにくくなる。この妨げの度合いを計算するのが圧力損失計算である。

今回指示のあった 4 建屋について圧力損失計算を行う際に用いた文献式<sup>1)</sup>は、熱交換器内の仕切り板(バッフル板)部を流れる流体の圧力損失を計算するための式であったが、これを迷路板部の圧力損失計算に転用する際に、その式の意味するところを誤って解釈したため、実際よりも多量の冷却空気が流れるとの計算結果を出していた。

誤って解釈した内容は以下のとおりである。

- (1) 圧力損失を求めるためには、迷路板部の流速を求める必要があるが、流速を決めるための流路断面積を正しい解釈に基づく値( 部 )よりも大きい値( 部 )を用いていた。概念的には、以下のとおりとなる。



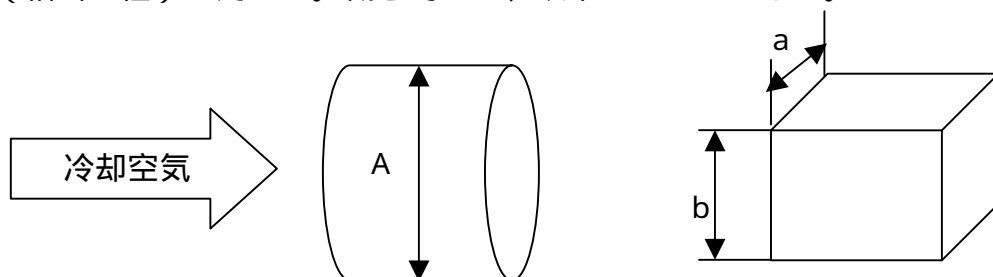
正しい解釈に基づく値( 部 )は、迷路板部平均断面積

( 図 5 の  $S = \overline{S_2 \times S_3}$  )

誤った解釈に基づく値( 部 )は、迷路板部を含む冷却空気流路の断面積

( 図 5 の  $S = S_1$  )

- (2) 断面が円形の機器を前提として作成されていた式を、冷却空気流路という断面が矩形であるところに適用する際に、矩形の辺  $a$  ,  $b$  を円の直径  $A$  に換算する概念 ( 相当直径 ) を用いた。概念的には、以下のとおりとなる。



文献式<sup>1)</sup>を正しく解釈すると、矩形断面の幅(図5の $D_s = a$ )であったが、実際の計算では、相当直径(図5の $D_s = 2(a \times b) / (a + b)$ )に置き換えた<sup>(注)</sup>。

(注)置き換えは、 $a / b$ の比により圧力損失が大きく計算される場合と小さく計算される場合がある。

#### 4.2 原因

圧力損失計算において文献式<sup>1)</sup>の解釈に誤りが発生した原因は、以下のとおりである。

- (1) 元請会社では、特定の機器の設計に使用される文献式<sup>1)</sup>を他の機器の設計に転用してプログラムを作成していたが、プログラムの変更に際して、プログラムの変更管理に関するルールがなかったため、検証が行われなかった。
- (2) 元請会社には、設計変更に係る設計レビューのルールはあったが、設計レビュー項目選定の基準が明確ではなかったため、その結果、設計レビューが行われなかった。
- (3) 当社では、設計変更管理における設計レビューについては、ルールが明確でなかったこと、元請会社に先行施設の特定廃棄物管理施設の「ガラス固化体貯蔵建屋」(以下「EB建屋」という。)の建設実績があったため、元請会社の設計を信頼していたことから、設計レビューがなされなかった。

#### 5. 設工認で使用した計算式及び解析コードの確認

今回の解析における誤りは、文献に載っている式を転用して迷路板部での圧力損失を計算するに当たり、その式の解釈を誤り、迷路板部での圧力損失を過小評価したことに起因している。(「4.1 発生事象」を参照)

このことから、特定廃棄物管理施設及び再処理施設を対象に、設工認の安全設計に使用した計算式について、同様の誤りがないことを確認することとした。加えて、設工認の安全設計に使用した解析コードについても、併せて確認することとした。これらの確認は、臨界、しゃへい、火災・爆発の防止、耐震、耐圧強度等の各分野に精通した専門知識を有する社員により実施した。

計算式については、他の原子力施設で使用実績があるか、規格や基準類で定められているか等、十分に検証された式であることを確認した上で、ある物質に適用する式を他の物質に転用した場合(例:液体に適用すべき式を気体に転用した場合)等の判断基準の下に、式の解釈に誤りのおそれのある計算式について洗い出しを行った。

解析コードについては、他の原子力施設で使用実績があるか等、十分に検証されたコードであることを確認した上で、そのコードを変更しているものについて洗い出しを行った。



計算式及び解析コードの妥当性確認フローを図6に示す。

この確認の結果、今回の崩壊熱の除去解析に用いた計算式以外で再確認が必要なものは、計算式が4件、解析コードが3件であり、しゃへい、耐震等の各分野に精通した専門知識を有する社員により詳細検討を行い、その適用に問題がないことを確認した。(表5、表6参照)

以上のことより、今回の崩壊熱の除去解析に用いた計算式以外の計算式及び解析コードについてはその使用に当たり解釈の誤りはなく、適用に問題はない。

## 6. 再発防止対策

今回の原因は、

- (1)元請会社では、特定の機器の設計に使用される文献式<sup>1)</sup>を他の機器の設計に転用してプログラムを作成していたが、プログラムの変更に際して、プログラムの変更管理に関するルールがなかったため、検証が行われなかったこと、
- (2)元請会社には、設計変更に係る設計レビューのルールはあったが、設計レビュー項目選定の基準が明確ではなかったため、その結果、設計レビューが行われなかったこと、
- (3)当社では、設計変更管理における設計レビューについては、ルールが明確でなかったこと、元請会社に先行施設 EB 建屋の建設実績があったため、元請会社の設計を信頼していたことから、設計レビューがなされなかったことの3点である。

これらについては、当時の設計変更管理に抜けがあったこと及びそれを監視できなかったことに関し、PDCA(計画、実施、評価、改善)が機能していなかった結果であると判断できる。

一方、プール問題等の不具合を受けて改善した現在の品質保証システム(平成16年5月以降)のルール(設計管理要領、不適合等管理要領)<sup>(注)</sup>では設計変更を適切に拾い出せるとともに、監視する仕組みとしての監査、設計審査会及び不適合検討ワーキングを設け審査することとしている。

(注)

設計管理要領 : 設計管理の方法として、設計レビュー、設計の妥当性確認の方法等を定めた要領

不適合等管理要領 : 不適合管理、是正処置、改善事項に係わる処理要領を定め、品質管理の向上を図るための要領

したがって、現在のシステムを当時に当てはめた場合、今回の件は設計レビューの対象として扱うこととなり、適切に処置できるものと考えている。

なお、今回の原因の一つが、元請会社が式の適用に当たっての解釈を誤ったことであることから、元請会社に対して式の適用解釈を誤らないような仕組み作りを要求す

るとともに、その実施及び監視をより確実にするよう、今回の事例をルールに盛り込むこととした。

具体的には、

- (1)当社は、設計管理要領に以下の事項を盛り込み、元請会社に対し、調達管理要領及び契約仕様書にて当社の要求を確実に実施させる。
  - (i) 特定の機器の設計に使用される文献式を転用して作成されたプログラムについては、プログラムを変更する際、文献における式の意味を確認するなどプログラムの変更管理を元請会社に徹底させる。
  - (ii) 設計の変更管理においては、「設計変更が当初設計の要求事項に合致しているか」の観点で、設計当初にさかのぼって設計レビューが行われるような、具体的なルールを元請会社に規定させる。
  
- (2)設計レビューにおいては、当社が要求する最終的な性能が試験・検査や段階的な試験運転で検証することが困難なものについて、十分な設計レビューを行うことを設計管理要領に盛り込む。

これらの対策の実施状況については、現在運用している品質保証システムの内部監査及び第三者監査により今後確認していく。

以上

表1 再評価の指示のあった設備及び類似の冷却構造を有する設備の一覧

	建屋名	略称	指示文書の記載	現在の状況
特定廃棄物 管理施設	ガラス固化体貯蔵 建屋B棟	EB2 建屋	クロスチェック解 析の結果差違のあ った設備	建設中（掘削中） 第1回設工認認可済 第2回設工認申請中
再処理施設	高レベル廃液ガラ ス固化建屋	KA 建屋	EB2 建屋と類似 の冷却構造を有す る設備	建設中 （冷却空気流路は施工済）
	第1 ガラス固化体 貯蔵建屋・東棟	KBE 建屋	同上	建設中 （冷却空気流路は施工済）
	第1 ガラス固化体 貯蔵建屋・西棟	KBW 建屋	同上	建設準備中 第1回設工認申請中

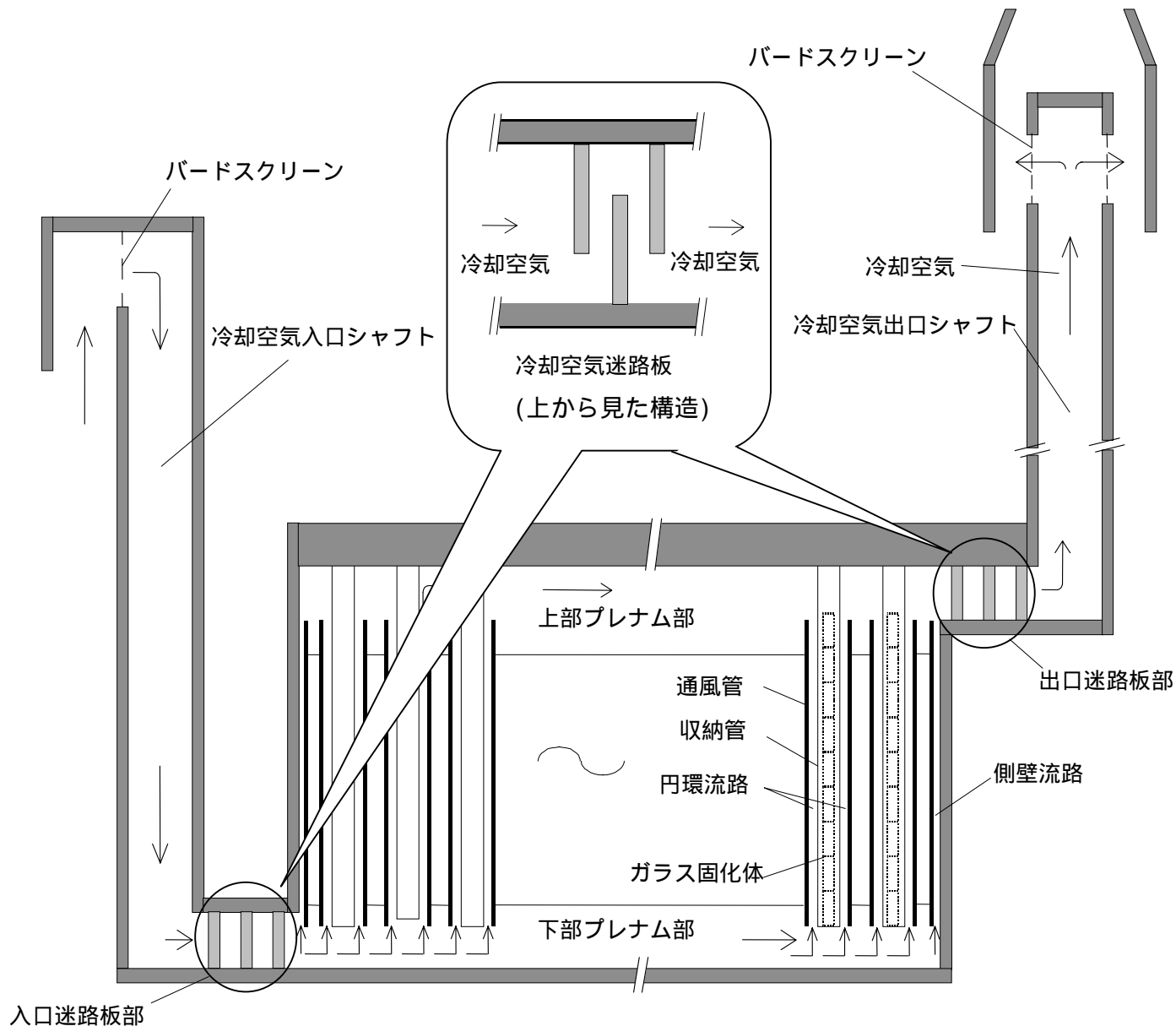


図1 EB2建屋の冷却空気流路の概略断面図

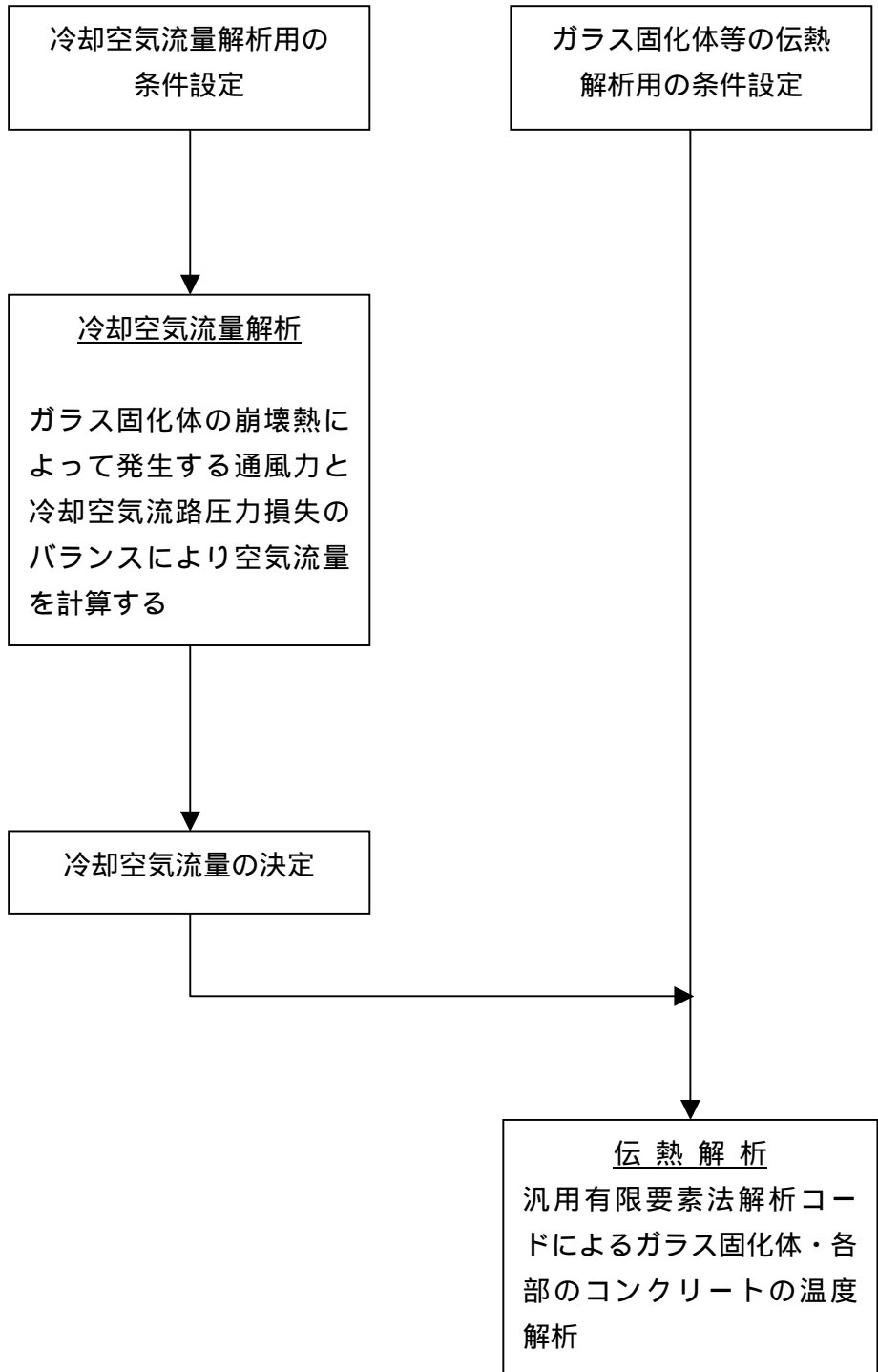


図2 ガラス固化体貯蔵設備の崩壊熱の除去解析フロー

表2 設工認と再評価における冷却空気流量解析の比較

解析方法	設工認における解析 (解析コード：CANDDY <sup>*1</sup> )	再評価における解析 (簡易計算)
入力条件	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ ガラス固化体発熱量</li> <li>・ 冷却空気入口温度</li> <li>・ ガラス固化体貯蔵設備形状</li> <li>・ 側壁コンクリートの線による発熱量</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ ガラス固化体発熱量</li> <li>・ 冷却空気入口温度</li> <li>・ ガラス固化体貯蔵設備形状</li> </ul>
解析を実施した貯蔵状態	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 全数貯蔵</li> <li>・ 収納管 1 本貯蔵</li> <li>・ ガラス固化体 1 体貯蔵<sup>*2</sup></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 全数貯蔵</li> </ul>
計算出力	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 冷却空気流量</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 冷却空気流量</li> </ul>

\* 1 : 冷却空気流量計算プログラム(Cooling Analysis of Natural Draft Dynamics)

\* 2 : E B 2 建屋のみ実施。

<簡易計算の前提条件>

各収納管での発熱量及び各円環流路での冷却空気流量は均一。  
側壁コンクリートの線による発熱及び側壁流路の冷却空気流量は考慮しない。

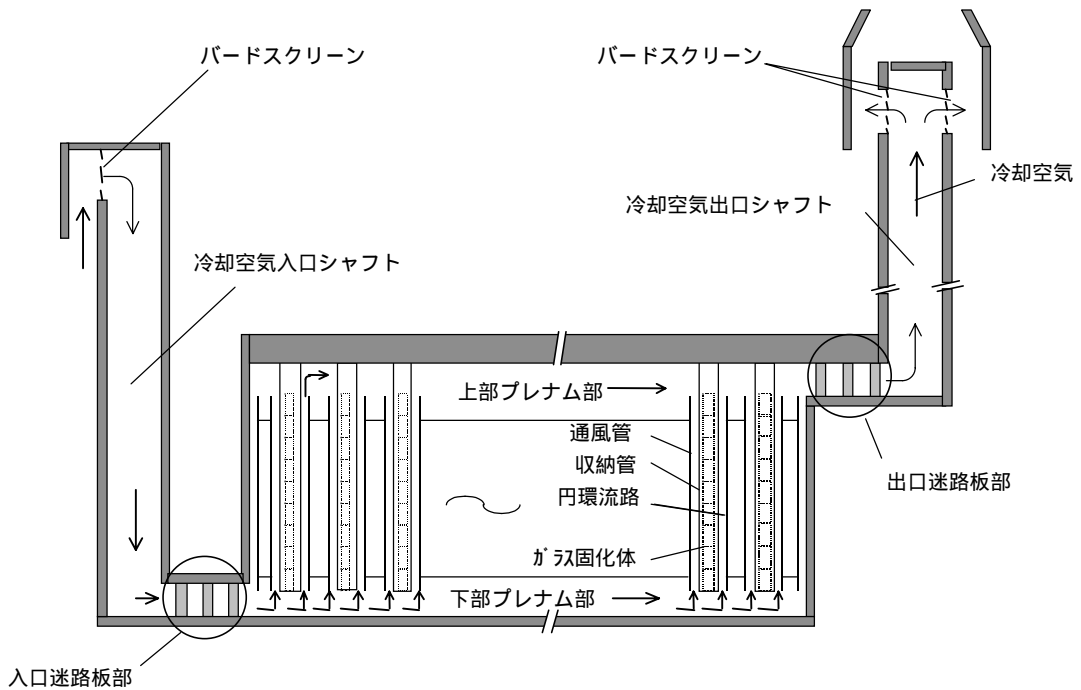


図3 冷却空気流量の再評価（簡易計算）の計算モデル

表3 再評価の結果（ガラス固化体を全数貯蔵した場合の崩壊熱除去解析）

			E B 2 建屋		K A 建屋		K B E 建屋		K B W 建屋		
			設工認の 計算値	再評価値 <sup>*1</sup> (簡易計算)	設工認の 計算値	再評価値 <sup>*1</sup> (簡易計算)	設工認の 計算値	再評価値 <sup>*1</sup> (簡易計算)	設工認の 計算値	再評価値 <sup>*1</sup> (簡易計算)	
全数貯蔵	ガラス固化体崩壊熱（1体当たり）		[kW]	2.0		2.3		2.3		2.3	
	冷却 空気	入口温度（外気温度）	[ ]	29	29	29	29	29	29	29	29
		上部プレナム部出口温度	[ ]	85	160	約75	116	約90	171	約90	249
		冷却空気流量	[kg/h]	97,811	39,296	58,597	30,063	100,316	41,739	165,750	47,120
		円環流路を流れる冷却空気 流量（1本当たり）	[kg/h]	1,147 <sup>*4</sup>	491	1,203	668	1,166	522	1,133	337
		圧力損失合計	[Pa]	75	146	62	105	80	154	81	198
		（入口迷路板部圧力損失）	[Pa]	(11)	(65)	(7)	(42)	(17)	(70)	(10)	(81)
		（出口迷路板部圧力損失）	[Pa]	(16)	(73)	(8)	(55)	(17)	(75)	(15)	(110)
	（円環流路及び その他部位の圧力損失）	[Pa]	(48)	(8)	(47)	(8)	(46)	(9)	(56)	(7)	
	温度	ガラス固化体中心 <sup>*2</sup>	[ ]	約410	500	約420	463	約430	519	約430	624
貯蔵区域天井部コンクリート <sup>*3</sup>		[ ]	65 以下	91	60 以下	77	65 以下	101	65 以下	136	

\* 1： 「Report S-SS-3-9 Heat Transfer Research Inc. 1987」による圧力損失の式を正しく適用した場合の計算結果。

\* 2： ガラス固化体の中心温度の設計目標値は 500 以下としている。

\* 3： コンクリート温度の設計目標値は日本建築学会発行の「原子力用コンクリート格納容器設計指針案・同解説」  
の中の通常運転時（長時間）のコンクリート温度制限値65 以下としている。

\* 4： 設工認申請書では伝熱解析に用いる冷却空気流量として、1,140kg/hとしている。

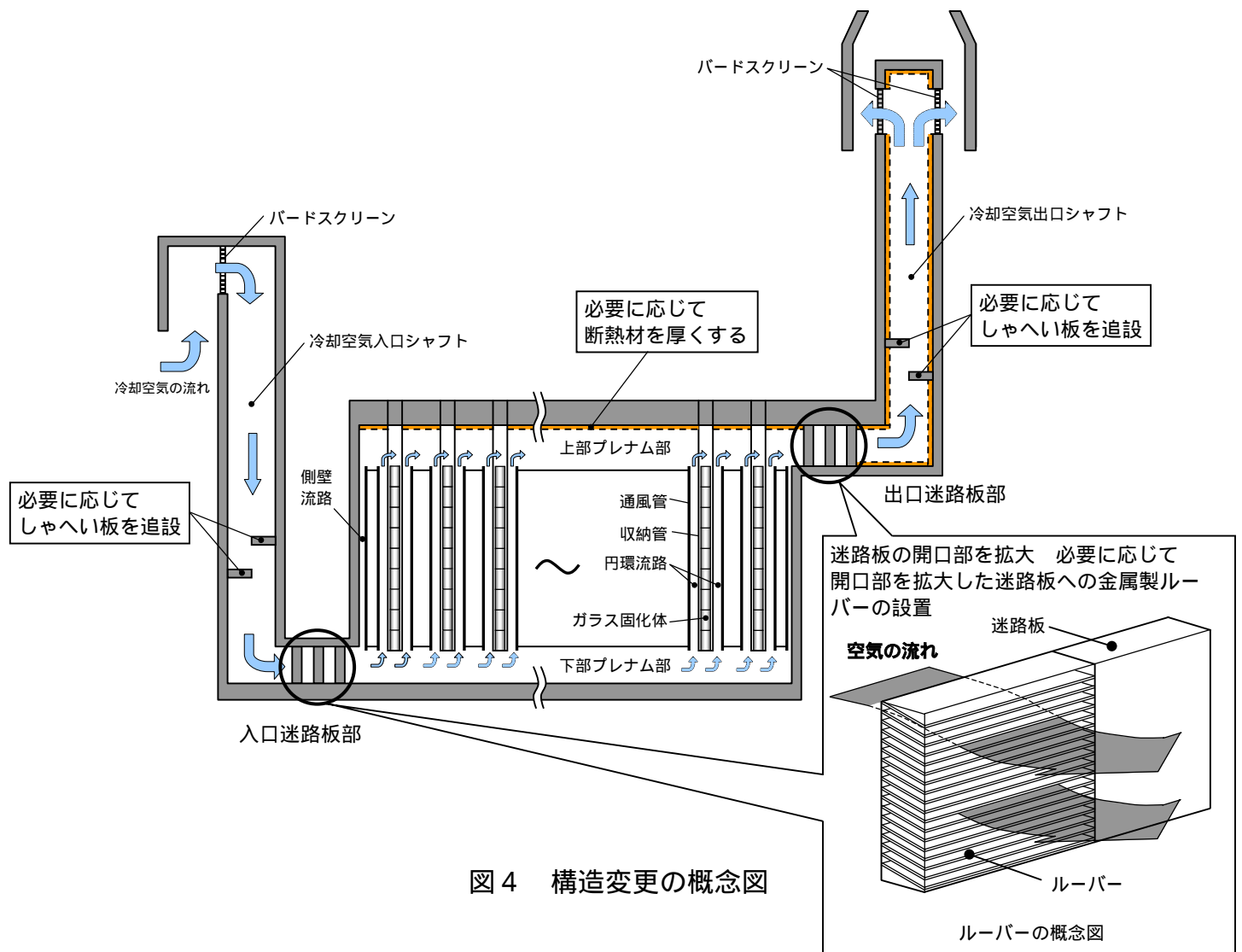


表4 各設備の今後の進め方

	EB2 建屋	KA 建屋	KBE 建屋	KBW 建屋
設工認の変更等	<ul style="list-style-type: none"> <li>・第1回設工認変更申請</li> <li>・第2回設工認申請書の一部補正</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・設工認変更申請</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・設工認変更申請</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・第1回設工認申請書の一部補正</li> </ul>
迷路板部等の改造工事の有無	未施工のため無	有	有	未施工のため無
特記事項	-	KA 建屋及び KBE 建屋の改造工事終了後にウラン試験の総合確認試験を実施する。		-



【文献式】

$$P = 2 \rho \frac{u^2}{2}$$

P : 圧力損失

$\rho$  : 密度

4.1(1) に関する文献式

u : 流速

W : 流量

$$u = \frac{W}{S}$$

S : 平均流路断面積

Ds : 管径

$$S = \frac{S_B \times S_W}{LBC}$$

LBC : 開口率 (%)

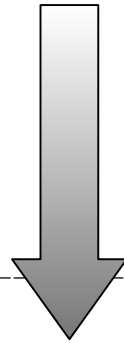
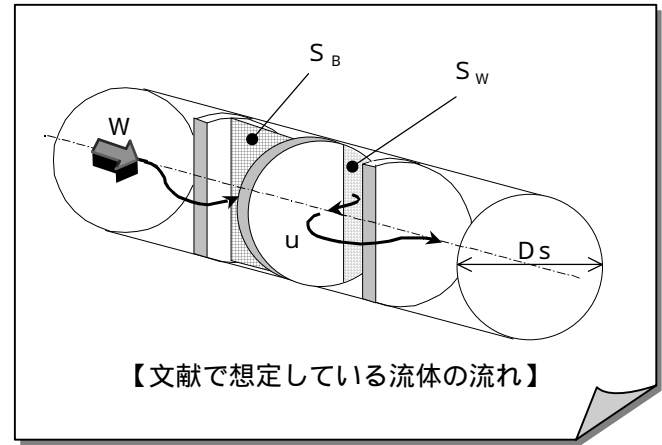
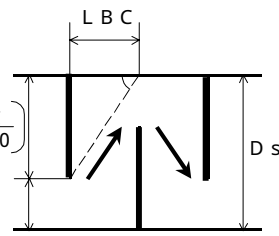
LBC : バッフル板の間隔

4.1(2) に関する文献式

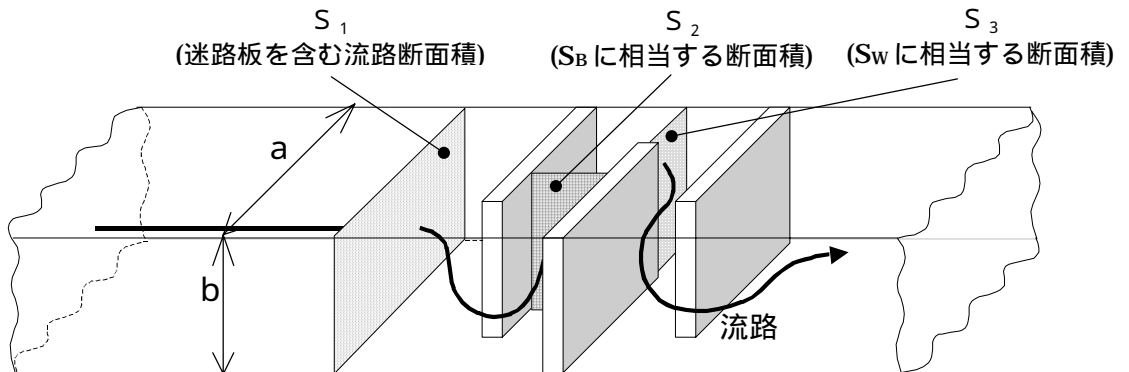
$$= \sin \tan^{-1} \left[ \frac{D_s \left( 1 - \frac{LBC}{100} \right)}{LBC} \right]$$

$$D_s \left( 1 - \frac{LBC}{100} \right)$$

$$D_s \left( \frac{LBC}{100} \right)$$



【矩形断面へ変換する際のモデル化】



	誤った解釈	正しい解釈	備考
4.1(1) 流路断面積の解釈誤り	$S = S_1$	$S = \frac{S_2 \times S_3}{LBC}$	圧力損失計算の誤りに与える影響大
4.1(2) 円形断面を矩形断面へ変換する際の解釈誤り	$D_s = \frac{2(a \times b)}{a + b}$	$D_s = a$	

図5 文献式での解釈誤りの事象

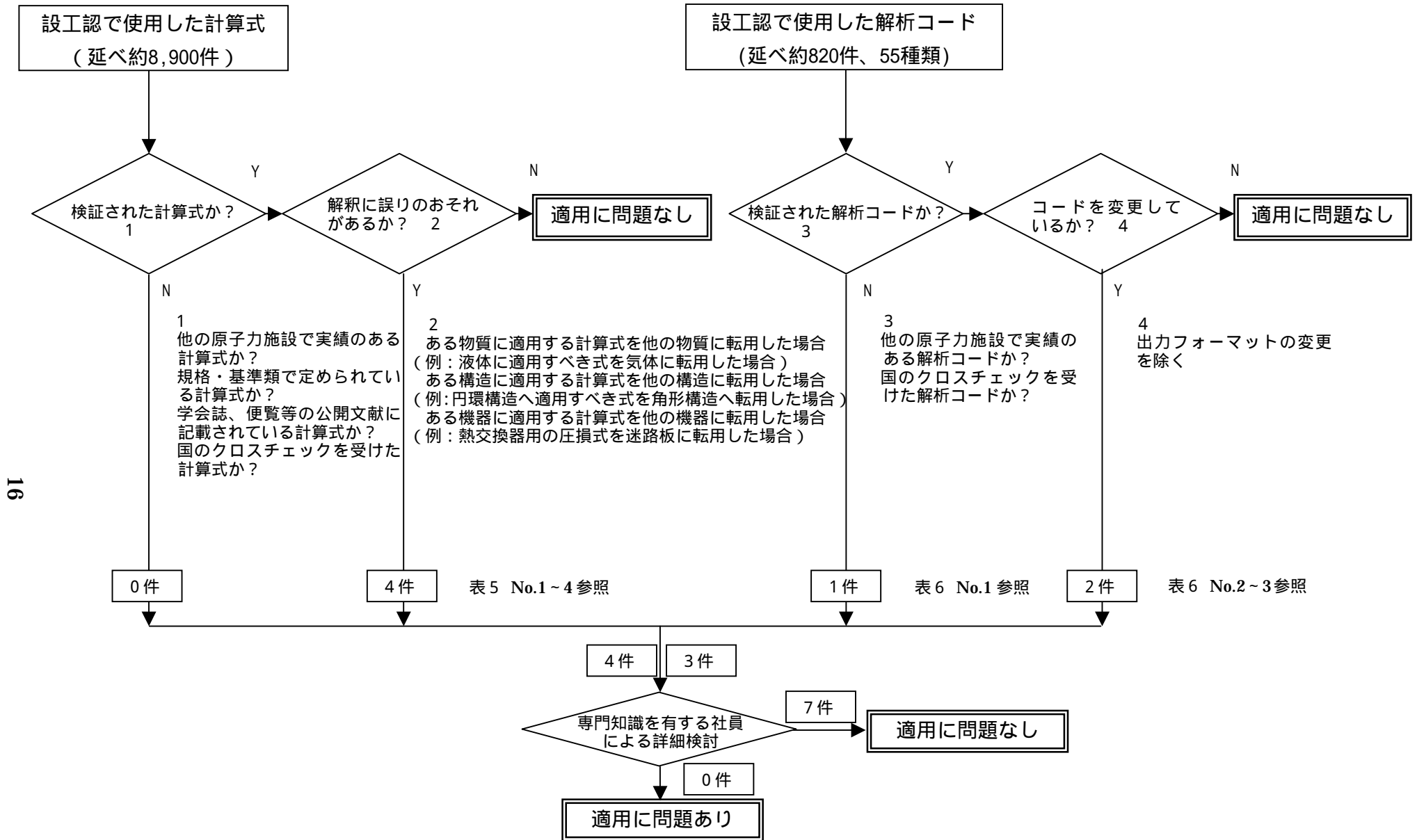


図6 計算式及び解析コードの妥当性確認フロー<sup>注)</sup>

注) ガラス固化体貯蔵建屋B棟にて用いた崩壊熱除去計算及び類似の冷却構造を有する設備の崩壊熱除去計算を除く

表5 計算式の妥当性確認の結果

No.	対象計算式	確認対象とした理由	確認結果
1	使用済燃料貯蔵プールにおける燃料収納缶等落下時のライニングの貫通厚さを求める式	<ul style="list-style-type: none"> <li>公開文献「REACTOR SAFEGUARDS」に記載があり、かつ原子炉施設のプールの設計で実績のある式が用いられているが、ライニングの貫通厚さを求めるのに、飛行物体が鋼板に衝突する際の貫通厚さを求める米国の実験式を転用しているため確認対象とした。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>左記実験式は、剛体(変形しない物体)である飛行物体が、空气中で鋼板に衝突した場合の貫通厚さを求める式である。本式の使用に当たっては、燃料収納缶を剛体としていること、ライニングのコンクリート支持や収納缶に働く水の抗力(水中を物体が移動する際に水から受ける力)を考慮しないことから、貫通厚さ評価としては安全側の結果が得られる方法であることを再確認した。なお、入力値に問題がないことを再確認した。</li> <li>燃料集合体の落下試験の結果から評価結果に十分な裕度のあることが確認されている。</li> </ul>
2	収納管プラグのストリーミングを評価する式(線)	<ul style="list-style-type: none"> <li>日本原子力研究所発行の公開文献「再処理施設の放射線遮蔽安全ガイド資料(JAERI M86-060)」に記載されている式を用いているが、段差が2段の屈曲部を有する収納管プラグの間隙部のストリーミング評価において、段差が1段の屈曲円環ダクトにおけるストリーミング評価式を組み合わせることにより2段の屈曲円環ダクトにおけるストリーミング評価式として利用しているため確認対象とした。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>左記公開文献で記載されている式では、屈曲部における放射線の散乱を安全側に設定しているのに加え、左記評価式の使用に当たっては、収納管プラグの間隙部の大きさを安全側に施工公差を考慮した大きさに設定していることから、ストリーミング評価としては安全側の結果が得られる方法であることを再確認した。なお、入力値に問題がないことを再確認した。</li> <li>汎用の解析コードであるDOTを用いて、段差が2段の屈曲部を有する収納管プラグについて別途評価しており、左記評価式による評価は安全側の結果が得られることが検証されている。</li> </ul>
3	収納管プラグのストリーミングを評価する式(n線)	同上	同上
4	使用済燃料収納使用済燃料輸送容器保管庫の冷却性能の確認に用いる計算式	<ul style="list-style-type: none"> <li>文献(空気調和衛生工学便覧)に記載されている一般式を用いており、ガラス固化体貯蔵建屋B棟と冷却構造は異なるが、自然空冷方式を採用しているため確認対象とした。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>発熱体である輸送容器による熱ドラフト力と、同保管庫上部の圧力損失との比較で、同保管庫での輸送容器の冷却能力を評価している。左記評価式の使用に当たっては、非常に単純なモデルを用い、通風路の屈曲部、拡大縮小部等の圧力損失や熱ドラフトで発生する通風量を安全側に設定していることから、冷却評価としては安全側の結果が得られる方法であることを再確認した。なお、入力値に問題がないことを再確認した。</li> <li>既に操業している施設であり、当該室内温度は外気温度と同程度であり、キャスクの冷却に何等問題が生じていない。</li> </ul>

表6 解析コードの妥当性確認の結果

No.	対象解析コード	確認対象とした理由	確認結果
1	FRAME : 洞道のフレーム部材の応力解析で用いている解析コード	・汎用コードであり一般構造物における実績はあるものの、既設原子力施設における実績はないため、確認対象とした。	・一般構造物の適用実績を確認したところ、国土交通省や独立行政法人建築研究所、土木研究所、日本道路公団等で使用されており、実績があるコードであることを再確認した。 ・本コードで解析した洞道は、再処理施設の同じ耐震クラスの洞道と比較すると同等の配筋がなされている。
2	GENDA : 建物の地震応答解析で用いている解析コード	・原子力発電所の耐震設計で使用実績がある解析コード（RESP4）に、地震時に建屋が接地している状態での解析を行う機能に加え、建屋の地震時の基礎浮き上がり機能を追加し、名称を GENDA へ変更した。 上記のように、機能が追加されているため、確認対象とした。	・建物の解析では、地震時に建屋が接地している状態での解析と地震力により基礎の浮き上がりが生じてからの解析とがある。本コードにより解析された再処理施設の建物は、地震時に建屋が接地している状態での解析であり、追加した機能に従った計算は行われていない。 従って、再処理施設の計算では、原子力発電所の耐震設計で使用実績がある解析コード（RESP4）と同じ計算であることを再確認した。 ・本コードで解析した建物は、再処理施設の同じ耐震クラスの建物と比較すると同等の配筋がなされている。
3	FRAME : 建物及び構築物のフレーム部材の応力解析、せん断力分配解析で用いている解析コード（静的弾性解析、静的弾塑性解析及び動的解析を行うことが出来る。）	・原子力発電所の耐震設計で使用実績がある解析コード（FRAME）に、建屋が非線形となった解析に対応するために静的弾塑性解析機能を、細かな時間刻みに対応するために静的弾塑性解析及び動的解析の部分で一部機能を追加しているため確認対象とした。（なお、静的弾性解析の部分については変更していない）	・部材が小さな力を受けた時には線形解析となり、大きな力を受けた時に非線形解析となる。フレーム部材の応力解析では、非線形となる計算を行っておらず、線形解析のみである。なお、本コードによる地震応答解析は行っていない。 従って、追加機能による解析を行っていないため、今回のフレーム部材の解析では、原子力発電所の耐震設計で使用実績があるコード（FRAME）と同じ計算であることを再確認した。 ・本コードで解析した建物及び構築物は、再処理施設の同じ耐震クラスの建物及び構築物と比較すると同等の配筋がなされている。

## 圧力損失計算において文献式の解釈誤りの発生に至った経緯

### 1. 元請会社における経緯

#### 1.1 EB 建屋の設計及び今回の再評価の対象となった KA 建屋、KBE 建屋、KBW 建屋の当初設計時（昭和 63 年～平成 4 年）

- (1) 上記 4 建屋は同時期に設計され迷路板の位置・形状が同じであり設計者も同一であった。
- (2) 設計者は最初に EB 建屋を設計したが、設計者は迷路板の圧力損失を計算するに当たって、管路・ダクトの流体抵抗の計算式では適切なものがなかったため、熱交換器の圧力損失の計算式（以下「HTRI\*式」という）を転用して、冷却流量計算用のプログラム（CANDDY）に追加した。
- (3) 設計者は HTRI 式の転用に際しては、上位の課長（HTRI が主宰する委員会の委員）に相談し、使用できることを確認した。
- (4) この EB 建屋のプログラムで、上記 4 建屋の崩壊熱の除去解析を行った。
- (5) 設計者は元請会社のルールに基づき、EB 建屋のプログラムの使用マニュアルを作成し、上長の承認を得た。
- (6) EB 建屋のプログラムの使用マニュアルには各部（迷路板、ルーバー、側壁流路）の圧力損失の求め方が図解されていたが、迷路板の図解には流路断面積の採り方（HTRI 式の流路断面積の算出方法は管路・ダクトの場合と異なり、 $S = \overline{S_B} \times \overline{S_W}$  として平均流路断面積を求める。）は記載されていなかった。但し(4)では正しい値が使用され、正しく計算されていた。（本文の図 5 参照）
- (7) 円筒形の機器を想定して断面が円形となるものにおける HTRI 式を、冷却空気流路のように断面が矩形である迷路板構造に適用する際は、円形断面の直径にあたる矩形断面の幅を用いる必要があった。EB 建屋のプログラム及び使用マニュアルでは、管路の圧力損失を求める場合に使用する相当直径としていた。EB 建屋の場合は圧力損失が大きくなる方向であった。（本文の図 5 参照）

\* HTRI: Heat Transfer Research Inc.(熱交換器に関する国際的な研究組合)

#### 1.2 KA 建屋及び KBE 建屋の設計変更時（平成 8～11 年）

- (1) KA 建屋及び KBE 建屋の当初設計から 7 年後に、迷路板の設計変更を行い、垂直な流路（シャフト部）に 2 枚の迷路板を設置する構造から、水平な流路（シャフト - プレナム間）に 3 枚の迷路板を設置する構造に変更した。
- (2) EB 建屋の設計者は退職しており、迷路板部の圧力損失計算式は熱交換

器の圧力損失計算の式を転用したもので、適用に当たっては注意が必要なことを詳しく知っている者がいなかった。

- (3) 迷路板の設計変更が圧力損失に影響を与えるため、KA 建屋及び KBE 建屋の設計者は迷路板の圧力損失を再度計算する必要があった。
- (4) KA 建屋及び KBE 建屋の設計者は EB 建屋のプログラムの使用マニュアルを参照して、プログラムを変更し、KA 建屋及び KBE 建屋の圧力損失を計算した。
- (5) KA 建屋及び KBE 建屋の設計者はプログラムの変更時に、EB 建屋のプログラムの使用マニュアルの図解に迷路板部の流路断面積の採り方が記載されていなかったため、迷路板が設置されている部位の形状（ダクトのような形状の流路に迷路板が設置されている、EB 建屋のシャフト部についても同じ）から、管路の場合の圧力損失計算に使用する水平流路部の断面積を使用した。（本文の図 5 参照）4.1 発生事象の(1)
- (6) KA 建屋及び KBE 建屋の設計者は、 $D_s$  を管路の場合の相当直径のまま使用したため、圧力損失計算結果が小さくなる方向になった。（本文の図 5 参照）4.1 発生事象の(2)
- (7) KA 建屋及び KBE 建屋の設計者が計算した結果を上位の課長が確認した。課長は KA 建屋及び KBE 建屋の当初設計から圧力損失が約 4 倍に増えていたが、迷路板の枚数増加と水平な流路部のルーバーの撤去による変更を考えると、計算結果は妥当と判断した。
- (8) 当時のルールでは、プログラムの変更管理のルールが規定されていなかったため、変更管理及び変更後のプログラムの検証は実施しなかった。4.2 原因の(1)
- (9) 迷路板の設計変更時の設計レビューについては、当時のルールでは設計レビューの項目の選定は担当部長が行うことになっていたが、当時の部長の判断で、しゃへいについてはレビューを実施したが、冷却性能への影響については担当課長による迷路板部の圧力損失計算結果の確認のみで良しとし、レビューを実施する必要がないとした。4.2 原因の(2)

### 1.3 KBW 建屋及び EB2 建屋の設計変更時（平成 12～15 年）

- (1) KBW 建屋については KBE 建屋の設計変更から 5 年後に、ガラス固化体の貯蔵密度を増大したため、迷路板の寸法・形状等の変更を行った。  
また、同時期に EB2 建屋の設計変更を行い、垂直な流路（シャフト部）に 2 枚の迷路板を設置する構造から、水平な流路（シャフト・プレナム間）に 3 枚の迷路板を設置する構造に変更した。
- (2) EB 建屋の設計者は退職しており、迷路板部の圧力損失計算式は熱交換器の圧力損失計算の式を転用したもので、適用に当たっては注意が必要

なことを詳しく知っている者がいなかった。

- (3) KA 建屋及び KBE 建屋の設計変更を行った者とは別の者が KBW 建屋及び EB2 建屋の設計を行った。KBW 建屋及び EB2 建屋の設計者は迷路板の圧力損失を再度計算した。
- (4) KBW 建屋及び EB2 建屋の設計者は EB 建屋のプログラムの使用マニュアルを参照して、プログラムを変更し、KBW 建屋及び EB2 建屋の圧力損失を計算した。
- (5) KBW 建屋及び EB2 建屋の設計者はプログラムの変更時に、EB 建屋のプログラムの使用マニュアルの図解に迷路板部の流路断面積の採り方が記載されていなかったため、迷路板が設置されている部位の形状（ダクトのような形状の流路に迷路板が設置されている。EB 建屋のシャフト部についても同じ）から、管路の場合の圧力損失計算に使用する水平流路部の断面積を使用した。（本文の図 5 参照）4.1 発生事象の(1)
- (6) KBW 建屋及び EB2 建屋の設計者は、 $D_s$  を管路の場合の相当直径のまま使用したため、圧力損失計算結果が小さくなる方向になった。（本文の図 5 参照）4.1 発生事象の(2)
- (7) KBW 建屋及び EB2 建屋の設計者が計算した結果を上位の課長が確認した。課長は KBE 建屋の設計変更後の圧力損失とほぼ同様の傾向であったため、計算結果を妥当と判断した。
- (8) 当時のルールでは、プログラムの変更管理が規定されていなかったため、変更管理および変更後のプログラムの検証は実施していない。4.2 原因の(1)
- (9) 迷路板の設計変更時の設計レビューについては、当時のルールでは設計レビューの項目の選定は担当部長であったため、当時の部長の判断で、しゃへいについてはレビューを実施したが、冷却性能への影響についてはレビューを実施せず、担当課長による迷路板部の圧力損失計算結果の確認のみで良しとした。4.2 原因の(2)

## 2. 当社における経緯

### 2.1 EB 建屋（昭和 63 年～平成 4 年）

計画部門、建設部門とも、迷路板部の圧力損失計算に関しては、計算結果は確認したが、設計レビューは実施しなかった。

### 2.2 KA 建屋及び KBE 建屋（平成 8～11 年）

- (1) 平成 8 年当時は、計画部門において当該変更に係る設計管理を行っていた。
- (2) 計画部門は、迷路板部の位置の変更による冷却性能への影響がないかについて、元請会社から、迷路板部の設計変更が EB 建屋に適用された手

法と同様の手法を用いて評価され、評価の結果についても、当該迷路板部については圧力損失が増大するものの、水平な流路部のルーバー撤去による圧力損失の低減により、圧力損失の合計は変更前より小さくなった、との説明を受けた。迷路板部の設計変更については、圧力損失の合計が設計変更前よりも安全側であったことから、崩壊熱除去性能として問題はないと判断し、迷路板部の変更を了解した。

- (3) 当時の設計管理要領では、構造や性能に係る設計変更があった場合には設計レビューを行うルールとなっていたが、設計レビューを行う基準が明確でなかったため、(2)で示した確認で良しとし、文献式<sup>1)</sup>の適用の妥当性まで確認するような設計レビューは実施しなかった。

4.2原因の(3)

- (4) 建設部門は、迷路板部の設計変更は計画部門において問題のないことを確認済みであり、計画部門へ元請会社が説明した迷路板部の設計変更に係る評価結果の資料を見て良しとし、設計レビューを実施しなかった。
- (5) 迷路板部の設計変更管理は当時の当社の本社組織における計画部門で行われていたが、設計変更に関して、現在の品質保証システムにおける設計審査委員会のような、設計変更を計画的、多角的にレビューする場がなかった。

4.2原因の(3)

## 2.3 KBW 建屋及び EB2 建屋（平成 12～15 年）

- (1) 計画部門は、迷路板部の設計変更にあたって、先行施設で採用されており許認可の実績もあったため、圧力損失計算の手法が変更となるような変更ではないと考え、圧力損失計算結果の確認で良しとし、設計レビューは実施しなかった。
- (2) 建設部門は、迷路板部は計画部門が確認した後からの変更はなかったため、圧力損失計算結果の確認で良しとし、設計レビューは実施しなかった。
- (3) 迷路板部の設計変更管理は当時の当社の本社組織における計画部門で行われていたが、設計変更に関して、現在の品質保証システムにおける設計審査委員会のような、設計変更を計画的、多角的にレビューする場がなかった。

4.2原因の(3)

以上