

1,2号機SGTS配管内汚染の分析

原子力規制庁長官官房技術基盤グループ
シビアアクシデント研究部門

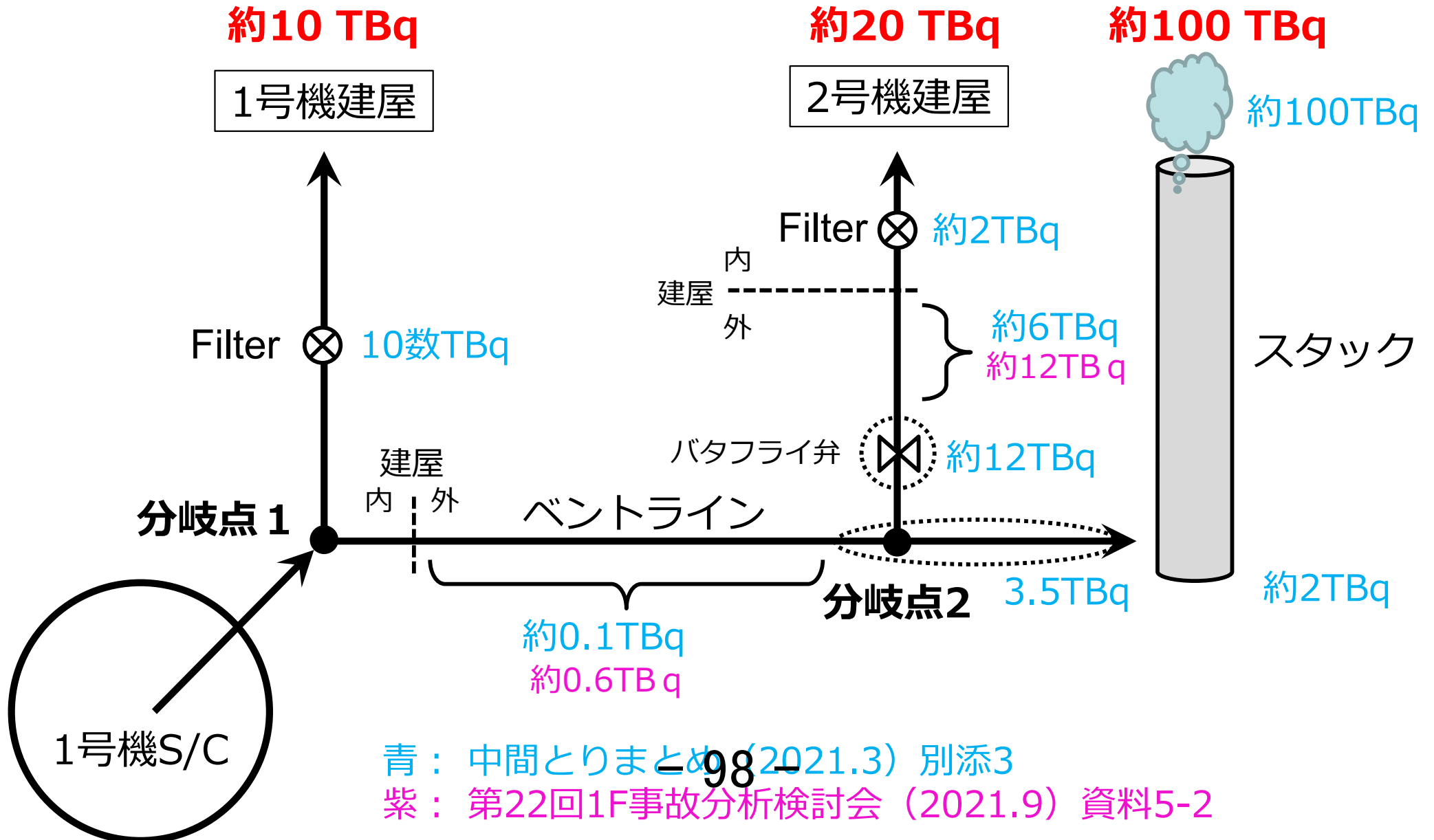
令和4年10月

はじめに

- 1,2号機SGTS配管の線量測定により、セシウム（Cs）の残留分布（次ページ）が推定されてきた
- 大半のベントガスが通過した配管（ベントライン）が低汚染な一方で、2号機のSGTS配管で高汚染となる等、その分布に至る原因が解明されていない
 - R2年度にJAEAが熱流動解析による検討を行ったが解明に至らず、R3年度からNRAが継続検討を行った
- **NRAによる検討内容（R3年12月の事故分析検討会で報告）**
 - 検討① 流量配分の再現解析
 - 検討② 蒸気凝縮と汚染分布の対応
 - 検討③ 時間変化（流動状態とCs濃度）を考慮した解析
- **前回報告で受けたコメント等を反映したため、今回、再度報告を行うものである**

測定結果に基づく推定Cs分布

【分岐点から流入したCs量の合計】



この検討で解決したい問題

- **ベントガスが1,2号機SGTS配管へと逆流した原因は？**
(1,2号機SGTSの状態がどうであったか？)
 - R2年度のJAEAの検討では、グラビティダンパ（GD）が設計どおり機能すれば十分な逆流が生じないこと、GDの漏えい面積を変化させることで十分な逆流が生じうることを確認した
 - **検討①：より定量的な情報提供として、測定結果から推定される逆流量を再現するプラントパラメータを算出**
- **なぜ大半のベントガスが通過したベントラインよりも2号機SGTS配管の方が高汚染となったか？**
 - R2年度のJAEAの検討では、沈着速度モデルによる汚染分布の評価では測定結果と整合しないことを確認し、ベント停止後のスタックからの逆流があったのではないかとの推測を行った
 - **検討②：蒸気凝縮の計算結果をより詳細に整理・分析**
 - 検討③：前回報告で、ベント中のフィルタ閉塞とCs濃度の時間変化による汚染分布の再現を試みましたが、検討②である程度説明できること等から、今回は報告を割愛する（p24~に参考として記載）

前回会合でのコメント

● 残留Cs分布（流量配分）の想定が適切か

- 線量測定から推定した残留Cs分布を正として解析しているが、その不確かさが大きい。例えば、1号機建屋は高線量で測定できておらず、1号機の残留Cs量が過小評価されている可能性がある
- 前提となる流量配分が変わっても結論が変わらないか？

→ 流量配分を変えた解析を行い、結論にどう影響するかを確認した

● RELAPで不適切な結果（水・蒸気の収支が正しくない）

→ 追加検討により若干改善した

● 2号機SGTS配管の汚染原因

- 2号機SGTS配管の汚染を説明するには、ベント停止後に2号機側の減圧による吸込みのような現象を想定せざるを得ないのではないか

→ 蒸気凝縮と高汚染箇所とに明確な対応関係が見られた

→ ベント停止後の吸込みによる逆流について考察を追加した

● 高汚染箇所の評価にはCFD等の詳細解析が必要

- 高汚染箇所は共通する幾何形状¹⁰⁰の特徴があり、幾何形状の影響の評価にはCFDのような詳細解析が必要

検討① 流量配分の再現解析

① 流量配分の再現解析 (1/3)

● 残留Cs量相当のベントガスが各経路へ流入したと仮定

- 流入したCs量を超えた配管の汚染は生じ得ない
 - ベントガスの逆流以外の流入経路はないと仮定

● 各経路への流量を決める要素

1. 流れの駆動力となる圧力差

- 出口圧力と分岐点圧力との差
- 出口圧力の変動要因
- 分岐点圧力はスタックの圧力損失（圧損）とベントラインの圧損で決まる

$$\text{圧損係数 } K: \Delta P = \frac{1}{2} K \rho V^2$$

(密度 ρ , 流速 V)

2. 経路上にある主な流動抵抗（圧損）

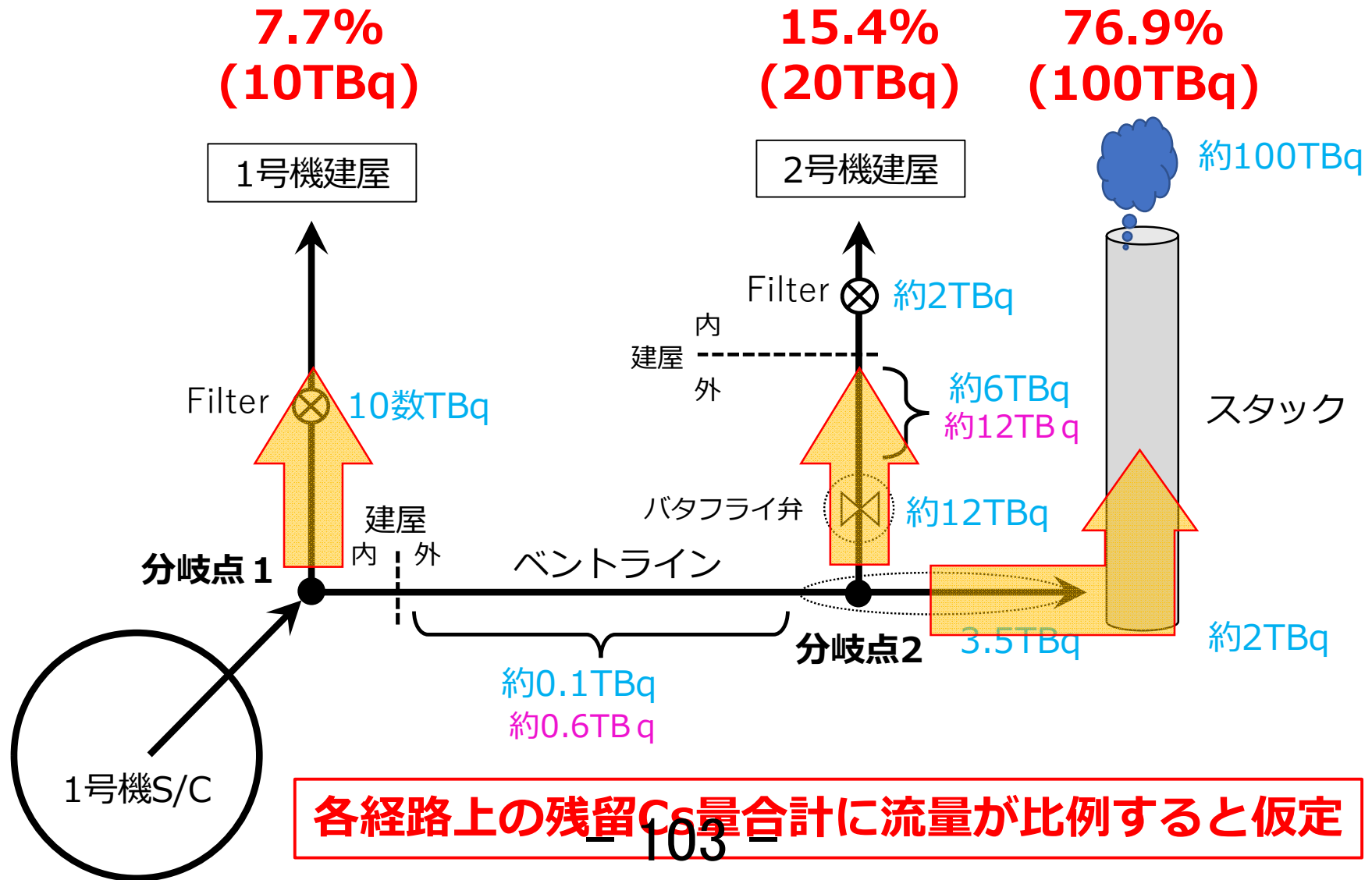
- 1,2号機SGTS：配管壁の摩擦、高低差、GDとSGTSフィルタの圧損
- ベントライン：配管壁の摩擦、高低差
 - GDとSGTSフィルタの圧損以外は、RELAPの評価モデルで計算可能

● 流量配分を再現する圧損係数（GD+SGTSフィルタ）を評価

- 1,2号機SGTSの状態の推定につながる情報
- 不確かさ要因（出口圧力、スタック圧損）を変えた感度解析も実施

① 流量配分の再現解析 (2/3)

- 推定Cs分布から設定した流量配分



① 流量配分の再現解析 (3/3)

● 1,2号機GD+SGTSフィルタの圧損係数の評価結果

流量配分 (1号,2号,スタック)	条件 (流量配分以外)	1号機 圧損係数	2号機 圧損係数
7.7%,15.4%,76.9%	ノミナル条件	3400	46
	1号機建屋圧力 +1 kPa	880	46
	スタック圧損係数10倍	5000	900
	2号機建屋圧力 -0.06 kPa	3400	123
10%,10%,80%	ノミナル条件	1900	200
15%,15%,70%	ノミナル条件	760	47

※GD圧損係数の設計値 $> 10^6$

- 1/2号機ともにGD設計値よりも圧損係数が圧倒的に小さい
- いずれの条件でも、2号機の方が圧損係数が1～2桁小さい
 - 分岐点1の圧力が分岐点2よりもベントラインの圧損だけ高くなるため、1号機の駆動力（圧力差 ΔP ）が2号機よりも大きい

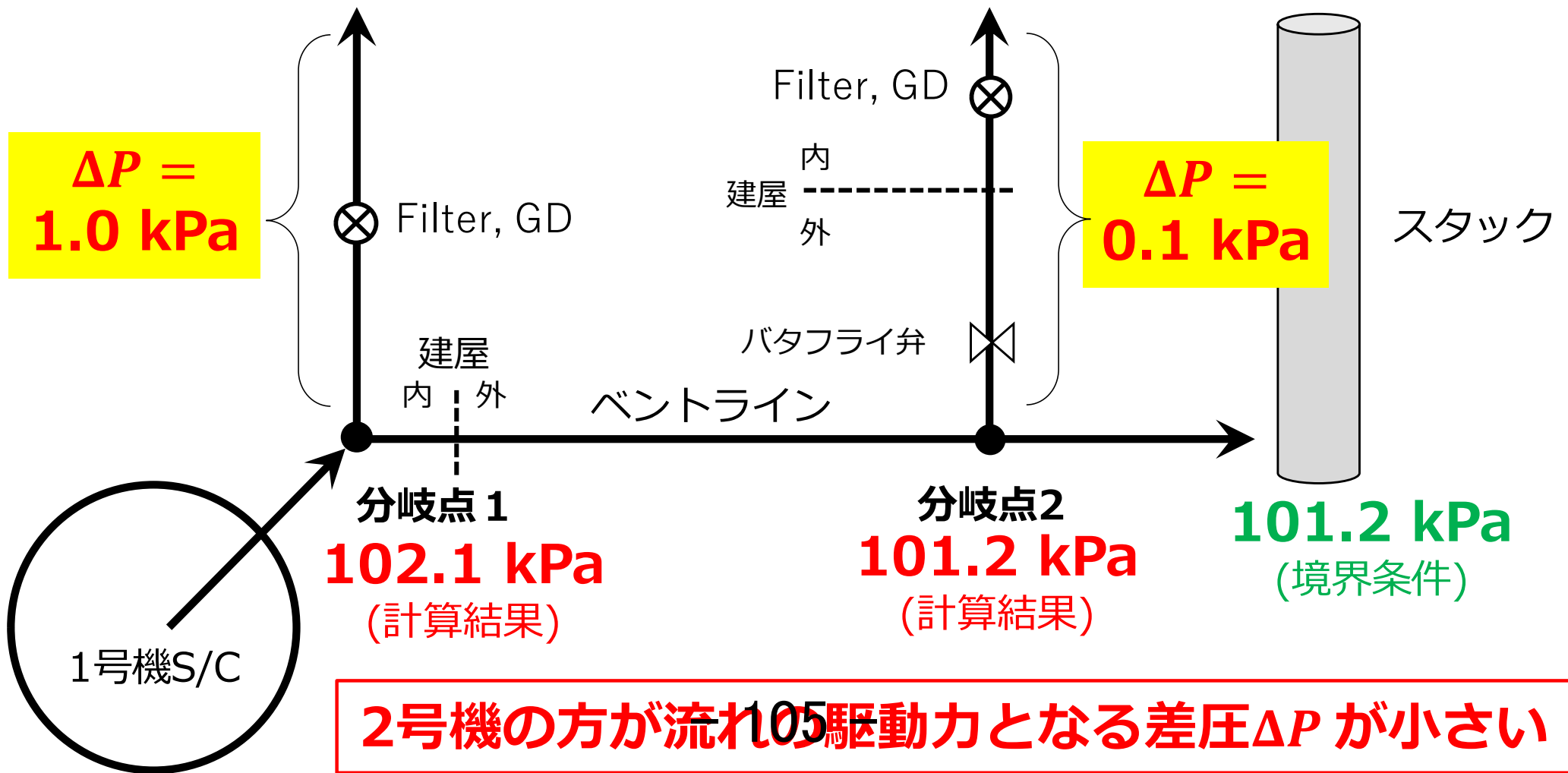
圧力分布 (ノミナル条件、ベント終了時)

101.1 kPa
(境界条件)

1号機建屋

101.1 kPa
(境界条件)

2号機建屋



2号機の方が流れの駆動力となる差圧 ΔP が小さい

検討②

蒸気凝縮と汚染分布の対応

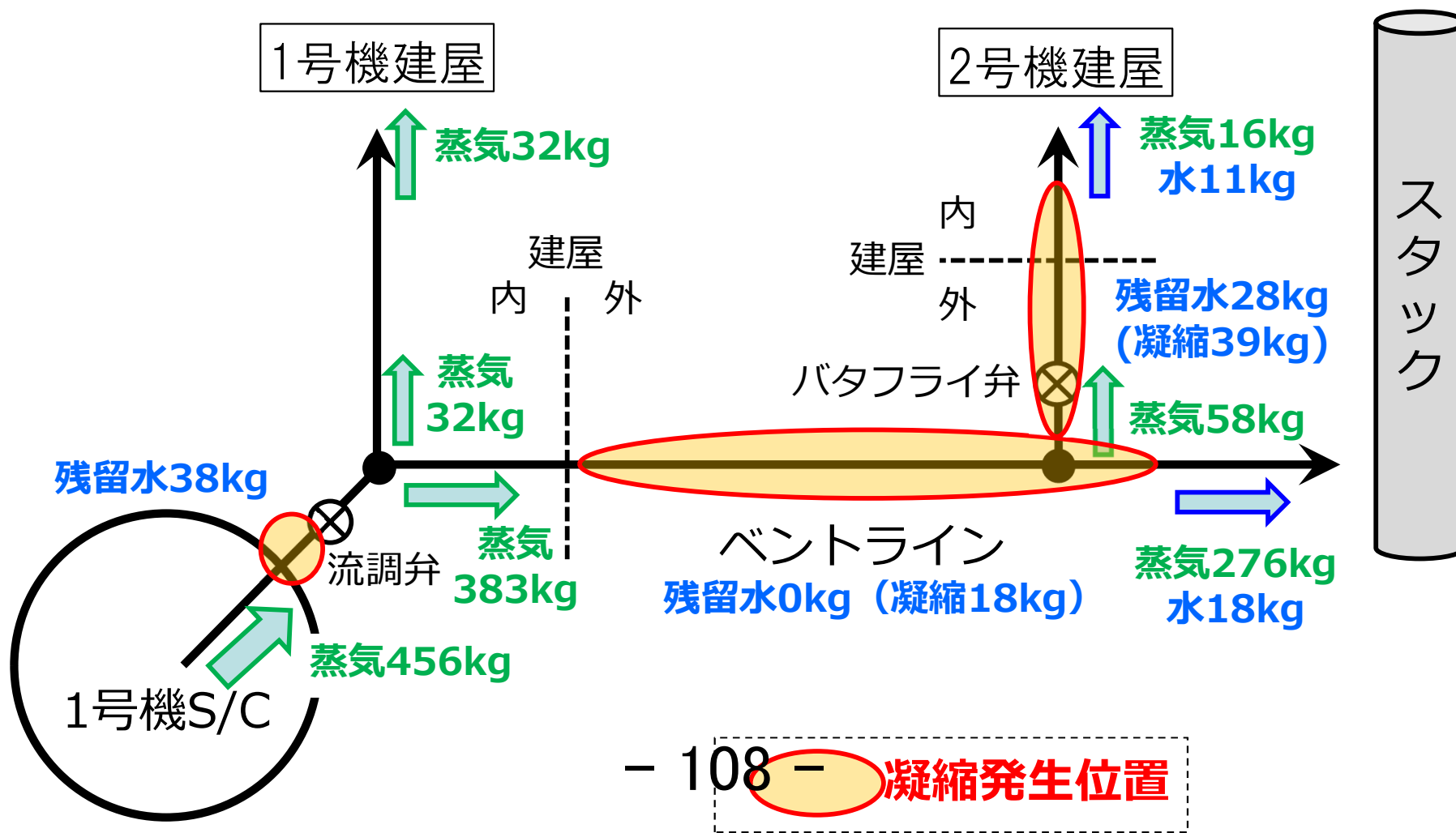
② 蒸気凝縮と汚染分布の対応 (1/8)

- 蒸気凝縮（計算結果）と汚染分布（測定結果）との間の関係性を確認する
 - － 蒸気凝縮により配管壁へのCsの吸着が促されると考えられる
- RELAPでは蒸気凝縮と凝縮した水の挙動を計算できるため、以下のRELAP解析結果を整理
 - － 蒸気凝縮が発生した位置と凝縮量
 - － 凝縮した後の水（残留水）の位置と量
- 質量バランスエラーの改善
 - － 前回報告において、水と蒸気の収支関係（質量バランス）が正しくないことを示した
 - － RELAPのノード分割を細分化することで改善
 - ただし、ノード分割の細分化だけでは限界あり（完全には解決できず）

② 蒸気凝縮と汚染分布の対応 (2/8)

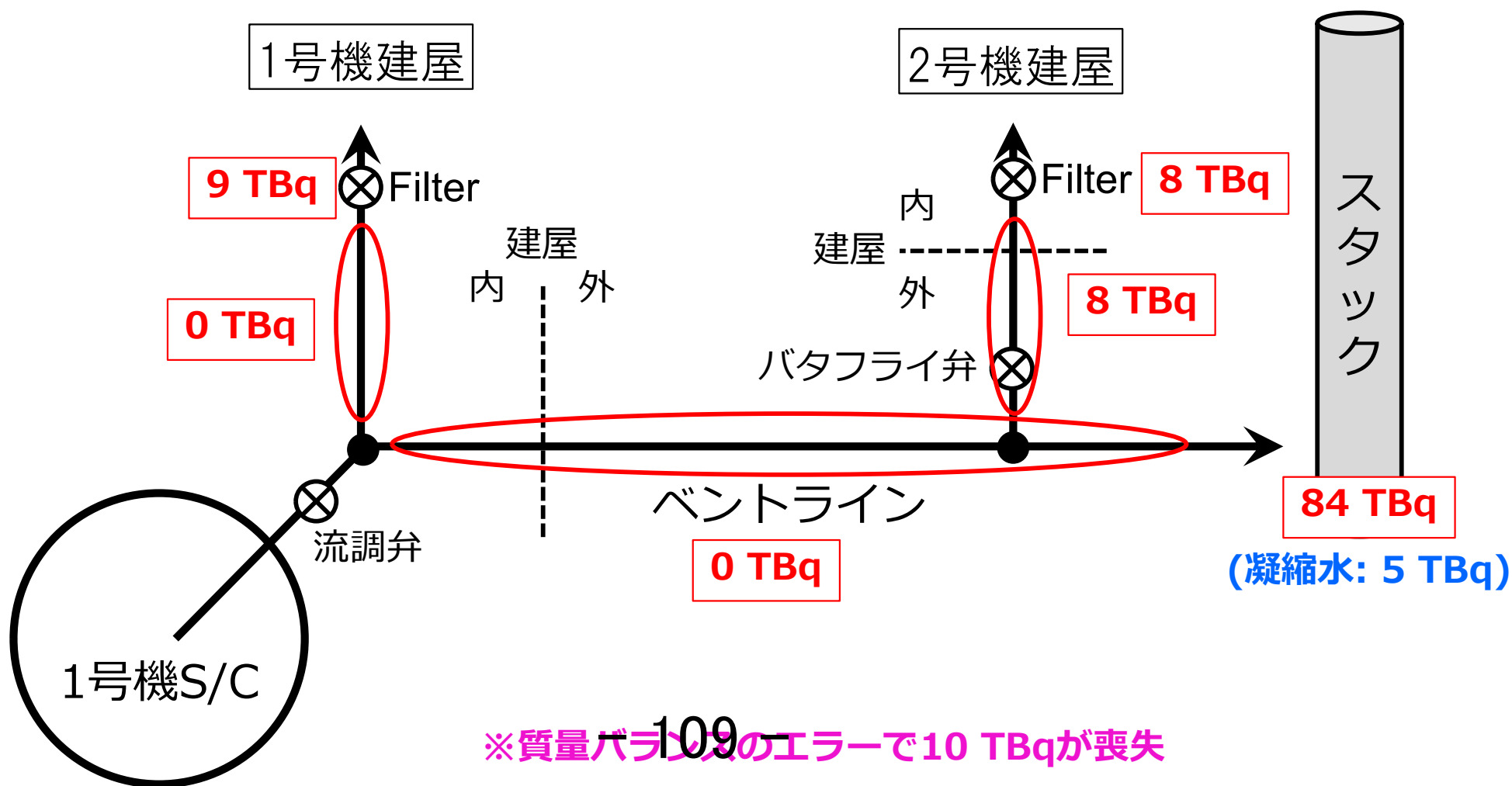
● 凝縮の発生位置と凝縮水の残留 (ノミナル条件)

- 下図 (凝縮・kg) : その場所で発生した蒸気凝縮量の累積値
- ベントラインで約30kgの水が消失 (質量バランスエラー)



② 蒸気凝縮と汚染分布の対応 (3/8)

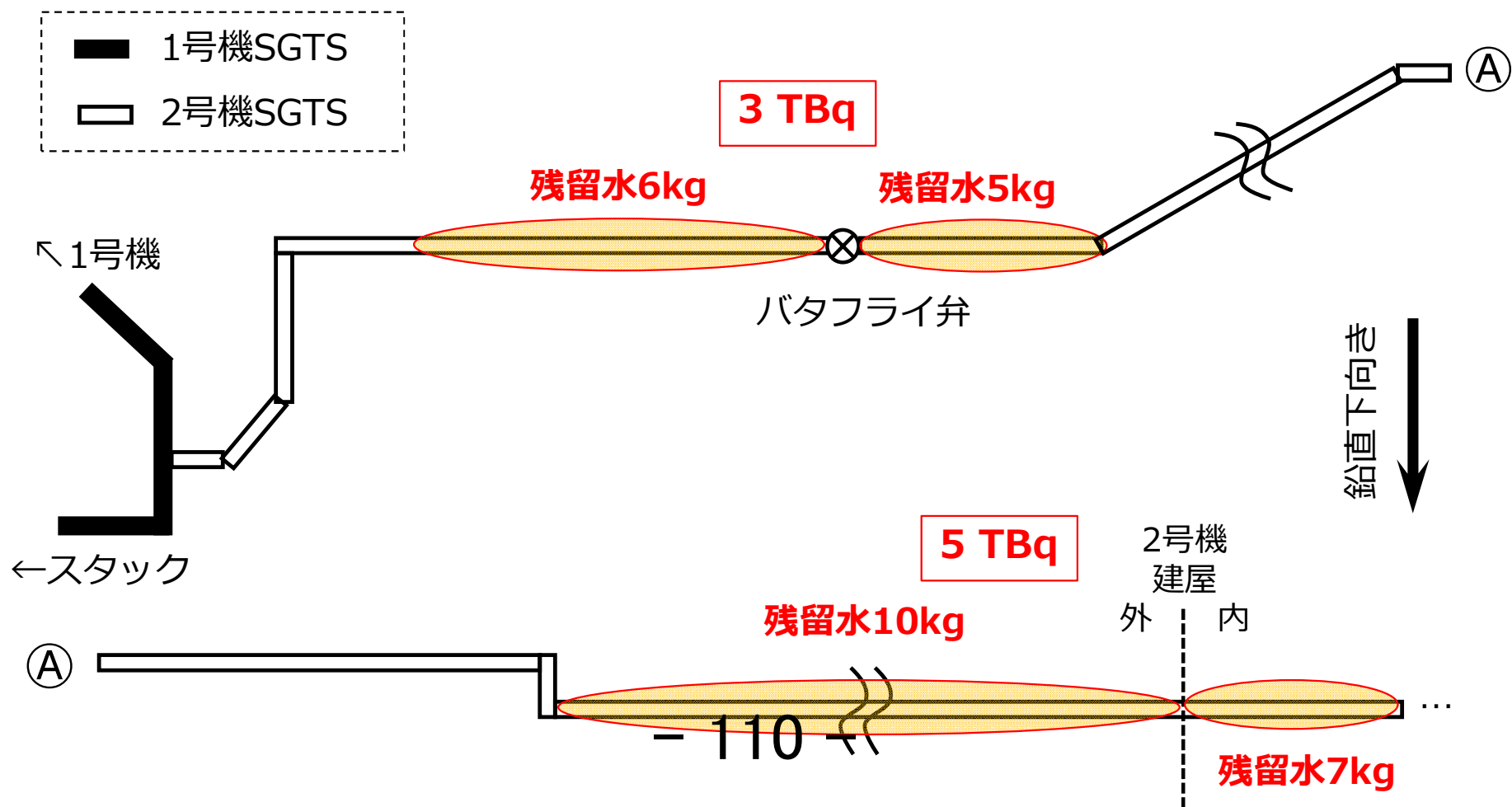
- 水の質量 = Cs量と仮定したときのCs分布 (ノミナル条件)
 - S/Cから流出する蒸気のトータル質量456kgを130TBqと仮定
 - 1,2号機の出口境界に到達した分はフィルタに残留と仮定



② 蒸気凝縮と汚染分布の対応 (4/8)

● 凝縮水の残留分布 (ノミナル条件：2号機流量配分15.4%)

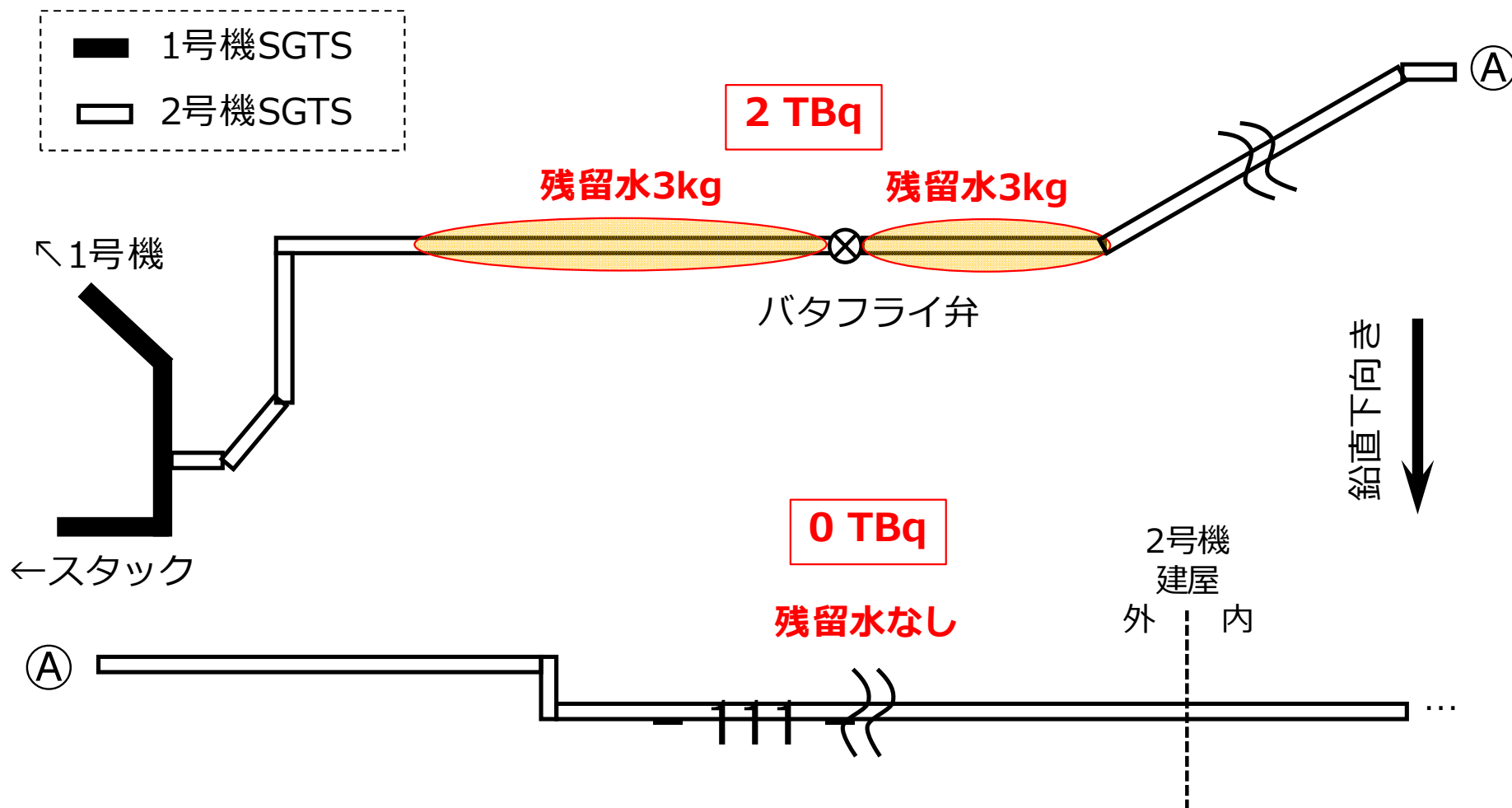
- 凝縮水の残留位置は配管の高さが強く影響
- は残留水の質量からCs量に換算 (前スライドと同じ)



② 蒸気凝縮と汚染分布の対応 (5/8)

● 凝縮水の残留分布 (2号機の流量配分が10%の場合)

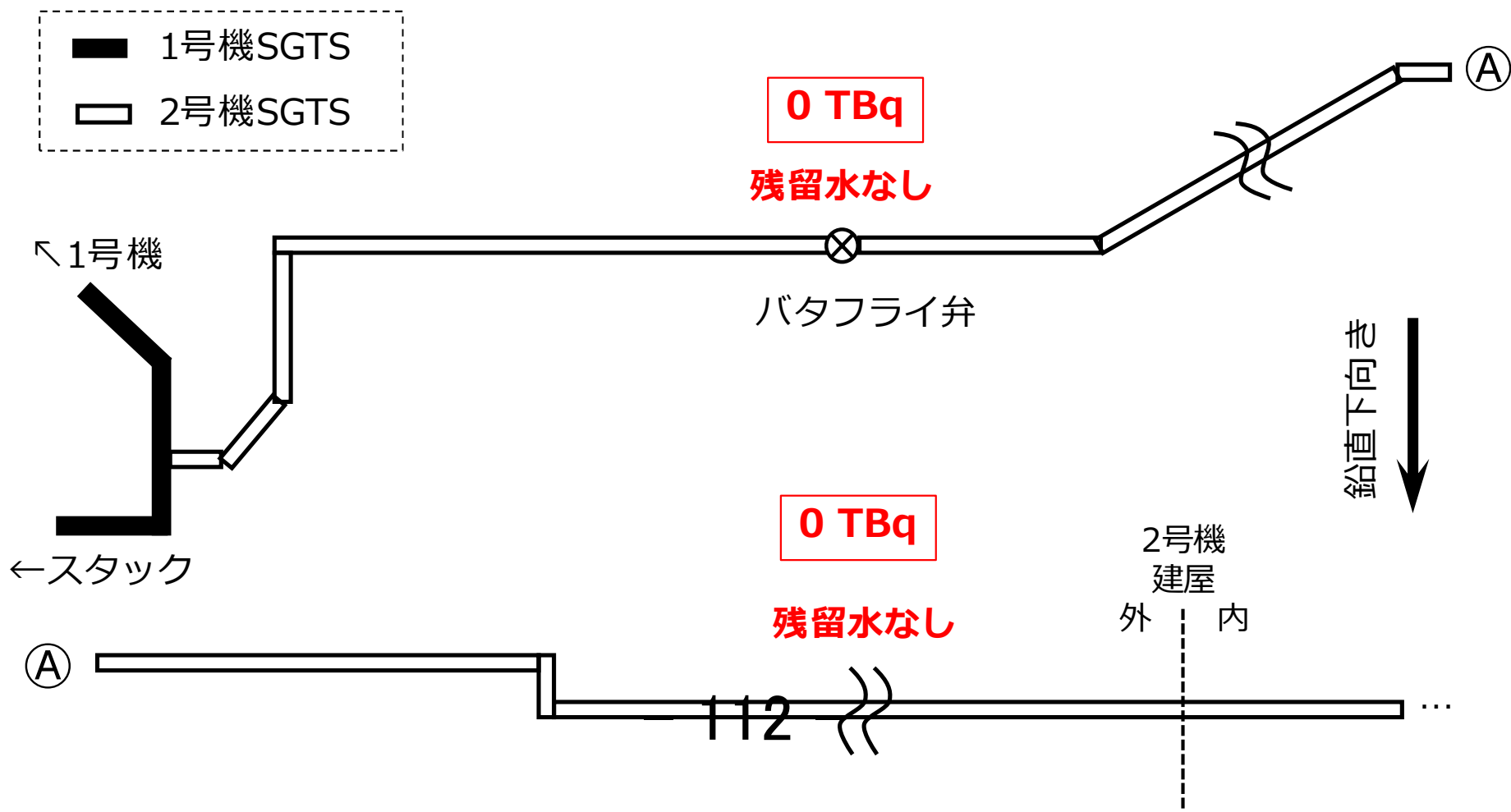
- 2号機の流量配分が15%→10%に減少すると、バタフライ弁近傍の残留水は微減であるが、下流側の残留水は消失



② 蒸気凝縮と汚染分布の対応 (6/8)

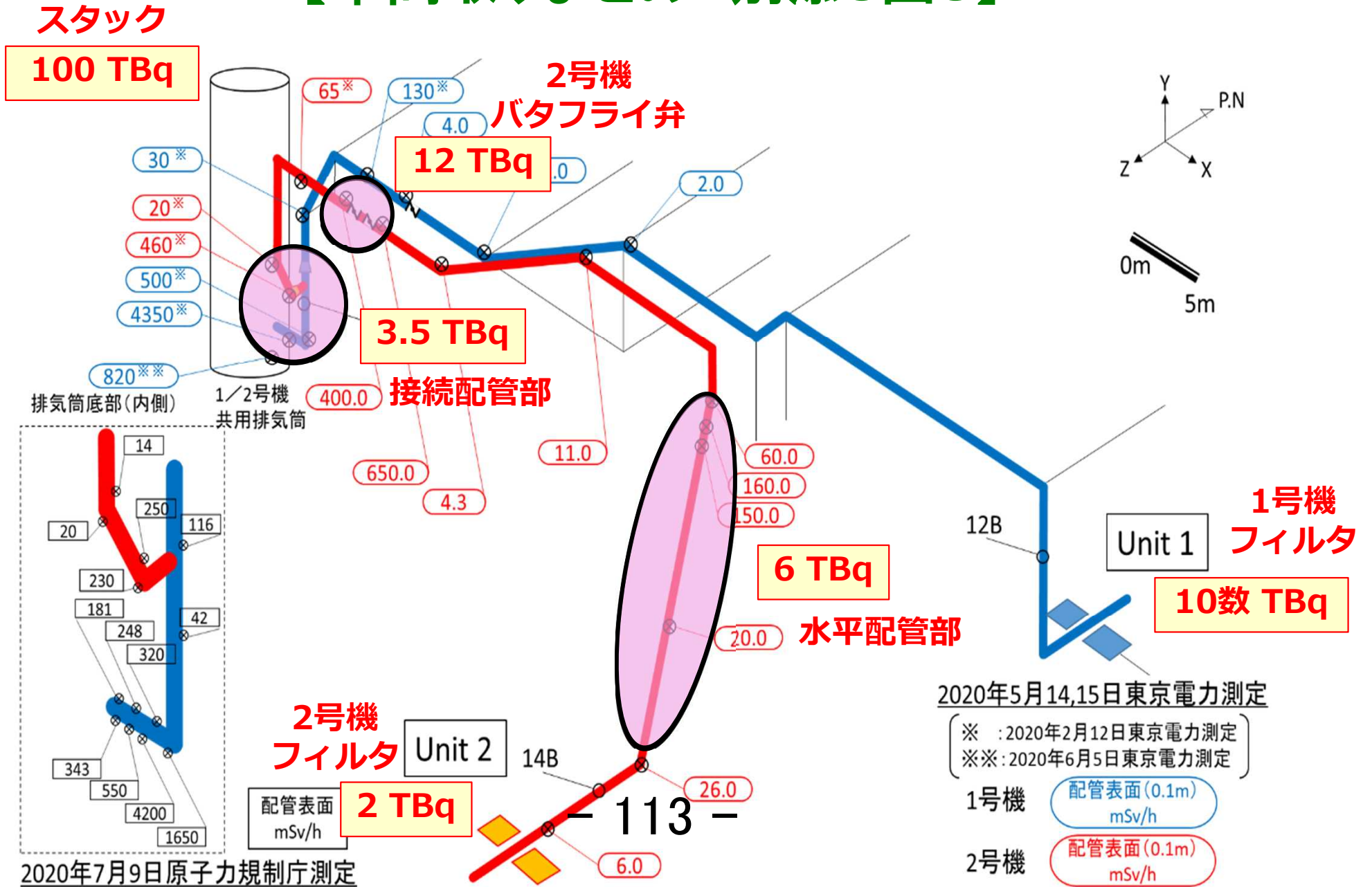
● 凝縮水の残留分布 (2号機の流量配分が5%の場合)

- 2号機の流量配分が5%まで減少すると残留水が消失
- R2年度のJAEA解析に相当する条件であり、凝縮水と汚染箇所との関連を見るには流量配分が少なかったと考える



② 蒸気凝縮と汚染分布の対応 (7/8)

【中間取りまとめ 別添3図3】



② 蒸気凝縮と汚染分布の対応 (8/8)

- **2号機SGTS配管とベントラインで蒸気凝縮が発生**
 - 凝縮発生位置と高汚染箇所は一致せず
- **凝縮水の残留位置と高汚染箇所とが一致**
 - 2号機SGTS配管では、凝縮水の残留位置と高汚染箇所とが一致
 - ベントラインでは、凝縮水の残留はなく全てスタックへ移動
 - ベントラインが低汚染であることと残留水がないことが整合
- **S/C～流調弁でも凝縮が発生**
 - 凝縮水の残留が生じていれば高線量となっている可能性あり
- **RELAP解析の信頼性について**
 - 質量バランスの崩れについて、前回報告からノード分割を適正化することで改善したが、完全な解決には至らず
 - 今回の解析条件に対する評価モデルの妥当性は明確ではなく、凝縮水の発生量や残留量の絶対値は信用すべきでないが、定性的な傾向を確認するには問題ないと考える
 - 評価モデルの妥当性の調査、別の解析コードとの比較など検討したい

ベント停止後の逆流について

● R2年度検討においてJAEAが行った考察

- ベント停止時において、スタック内に相当量のCsが残留していた可能性あり
- ベント停止後に、2号機SGTS配管内の蒸気凝縮等により2号機側で減圧が生じてスタックから2号機SGTS配管への逆流が生じる可能性あり
- 上記2つが同時に起こることで、2号機SGTS配管内の高汚染が生じたのではないかと？

● 上記考察に対する意見

- 凝縮水の残留位置と高汚染箇所とが一致するとの説明の方を支持したい
 - JAEAの検討では、2号機の流量配分が小さく、ベント中に十分な凝縮が発生しない評価だったため、凝縮と汚染箇所を関連付ける結果が得られていなかった
- スタックから2号機バタフライ弁に至るには配管を高さ約6m、その先の高汚染箇所にはさらに高さ8mの上昇区間があり、セシウムエアロゾルを押し上げるほどの駆動力が生じないのではないかと
 - スタック接続位置の配管内汚染の説明には、JAEAの考察が使えるかもしれない
- スタック内のCs残留については、別アプローチでの検討が必要
 - スタック内の流動状況は不明（RELAPでは評価できない）
 - スタック内のエアロゾルの残留状況を評価できれば、スタック底部や接続配管部の汚染の解明につながるかもしれない

RELAP熱流動解析の結論

① 流量配分の再現解析

- 1/2号機ともにGD設計値よりも圧損係数が圧倒的に小さい
- 2号機SGTSの方が1号機より圧損係数が1~2桁小さい

② 蒸気凝縮と汚染分布の対応

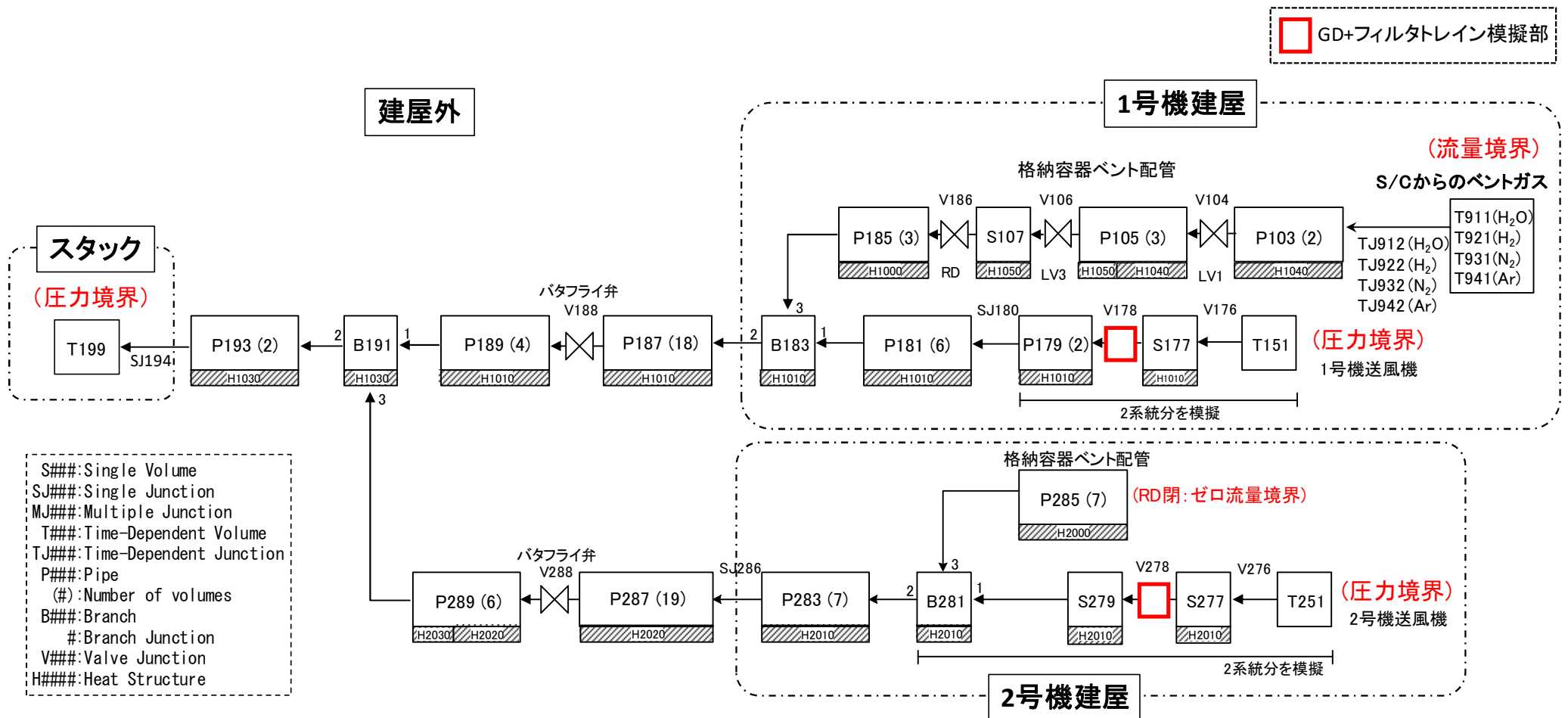
- 凝縮水の残留位置と高汚染箇所（2号機SGTS配管の2か所）とが一致
 - ベントラインには凝縮水の残留がなく、低汚染であることとも整合
- S/C～分岐点1でも凝縮水の残留箇所があれば高線量の可能性あり

③ 時間変化（流動状態とCs濃度）を考慮した解析

- 前回報告において、Cs濃度の時間変化、蒸気によるフィルタの目詰まりの考慮で、ベントラインよりも1/2号機SGTSが高汚染という状況が再現し得ることを確認
- しかし、S/C～分岐点1で高線量箇所があるとの観測結果（前回報告における東電コメント）を、このシナリオ単独では説明できない

参考

RELAP解析のノーディング図



● JAEAの解析インプットを修正して利用

- スタック内の流動は適切に評価できないため、圧力境界に変更
- ベントガス中のCs追跡用にArガスを結果に影響しない量を追加
- ノード分割を見直し (粗く分割されていたノードを細分化)

検討③
時間変化（流動状態とCs濃度）
を考慮した解析

③ 時間変化を考慮した解析 (1/5)

● 流動状態とCs濃度は時間変化する

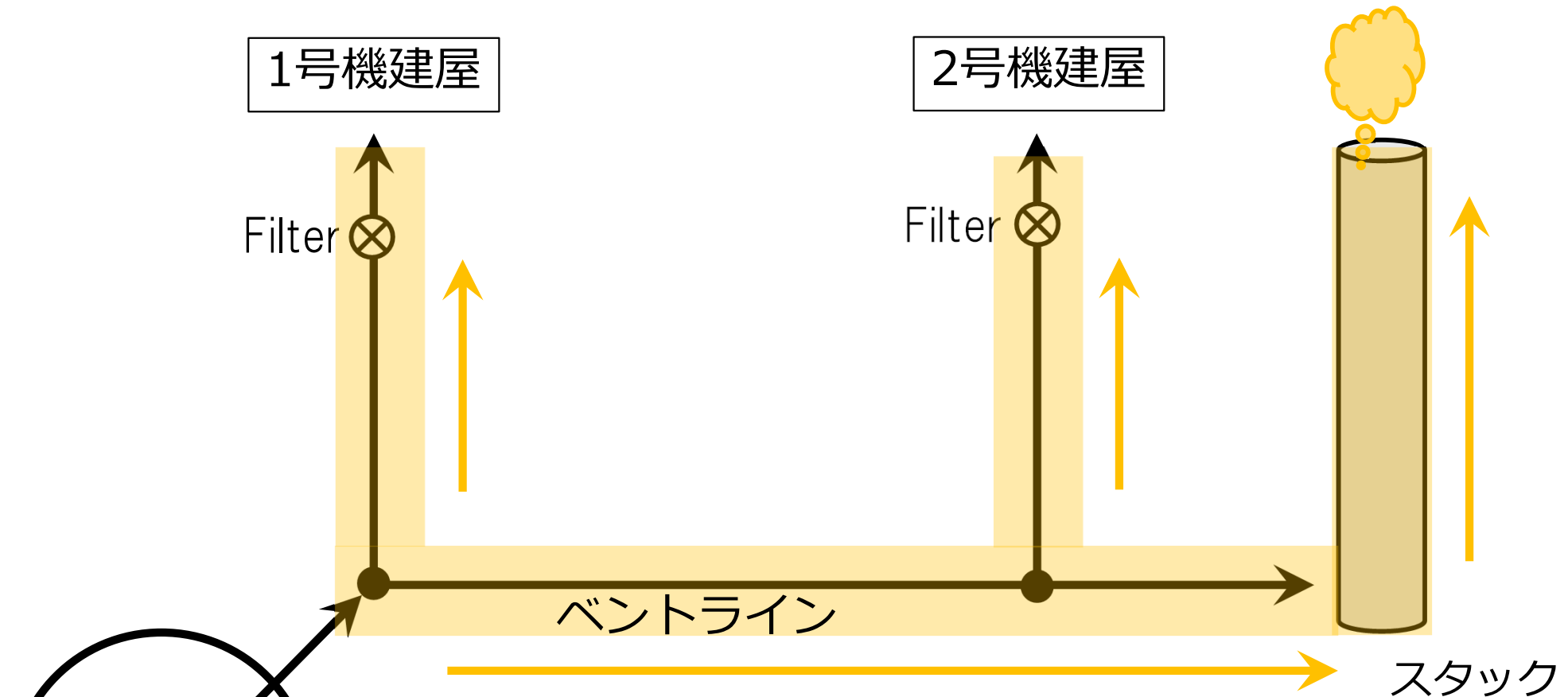
- SGTSのフィルタライン（HEPAフィルタ）に蒸気が流入すると、水で目詰まりを起こし得る
- Cs濃度はベント直後は高く、その後低下する
 - S/CにたまっていたCsがベント初期に放出されるため

● 2つの時間変化の組合せにより、ベントラインよりも2号機SGTSの方が高汚染となり得る

- ベント中に蒸気でSGTSフィルタが目詰まりが起きれば、SGTSへの逆流が止まる
- 初期の高濃度CsがSGTSに残留し、ベントラインは後半の低濃度ガスで置換されれば、最終的に2号機SGTS配管内の方がベントラインよりも高汚染となる
- RELAP解析で上記のような状況が生じるかを検討

③ 時間変化を考慮した解析 (2/5)

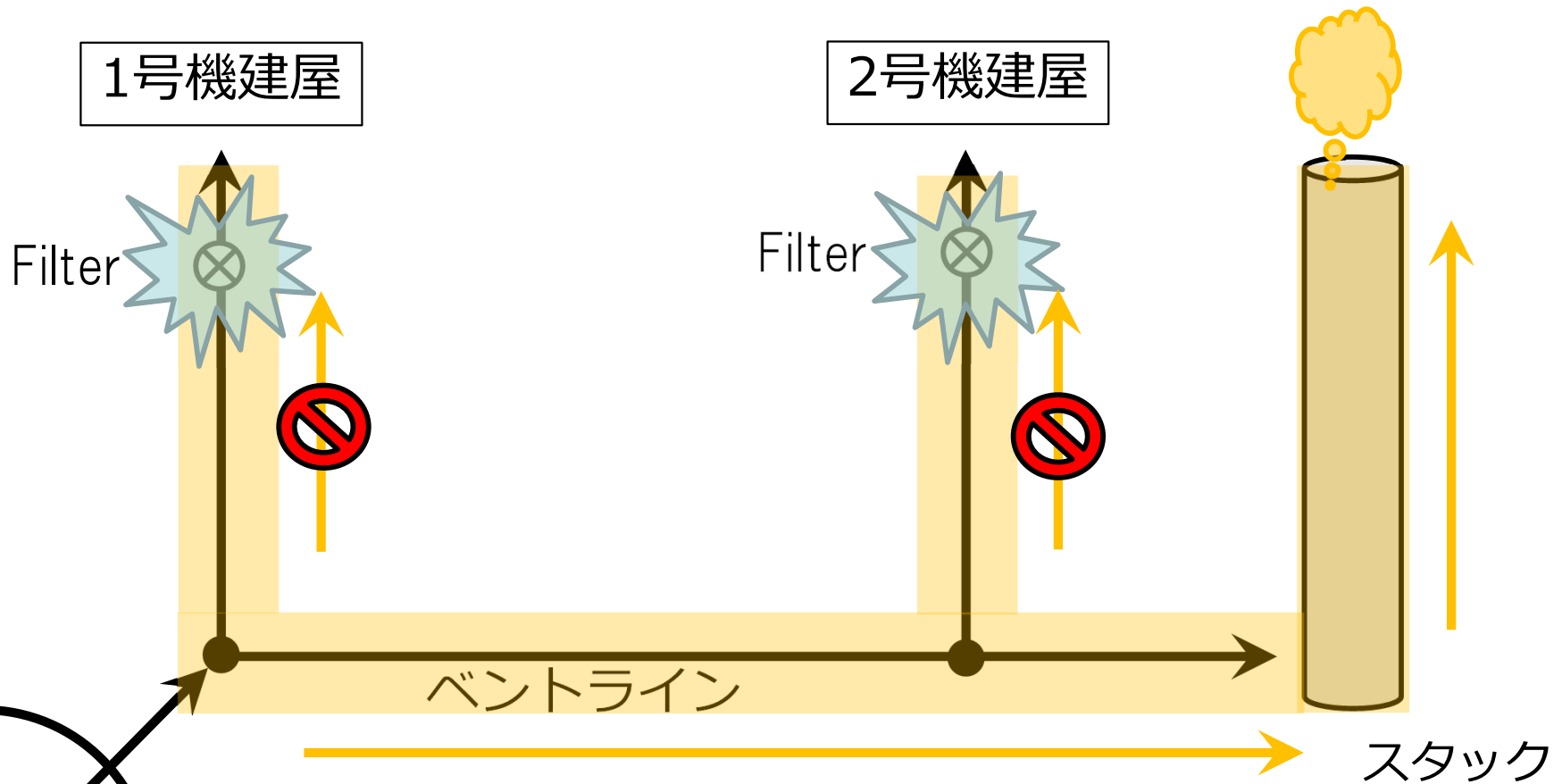
ベント初期



高濃度Csを含むベントガスが配管内に充満
= 121 =

③ 時間変化を考慮した解析 (3/5)

フィルタが水で目詰まり

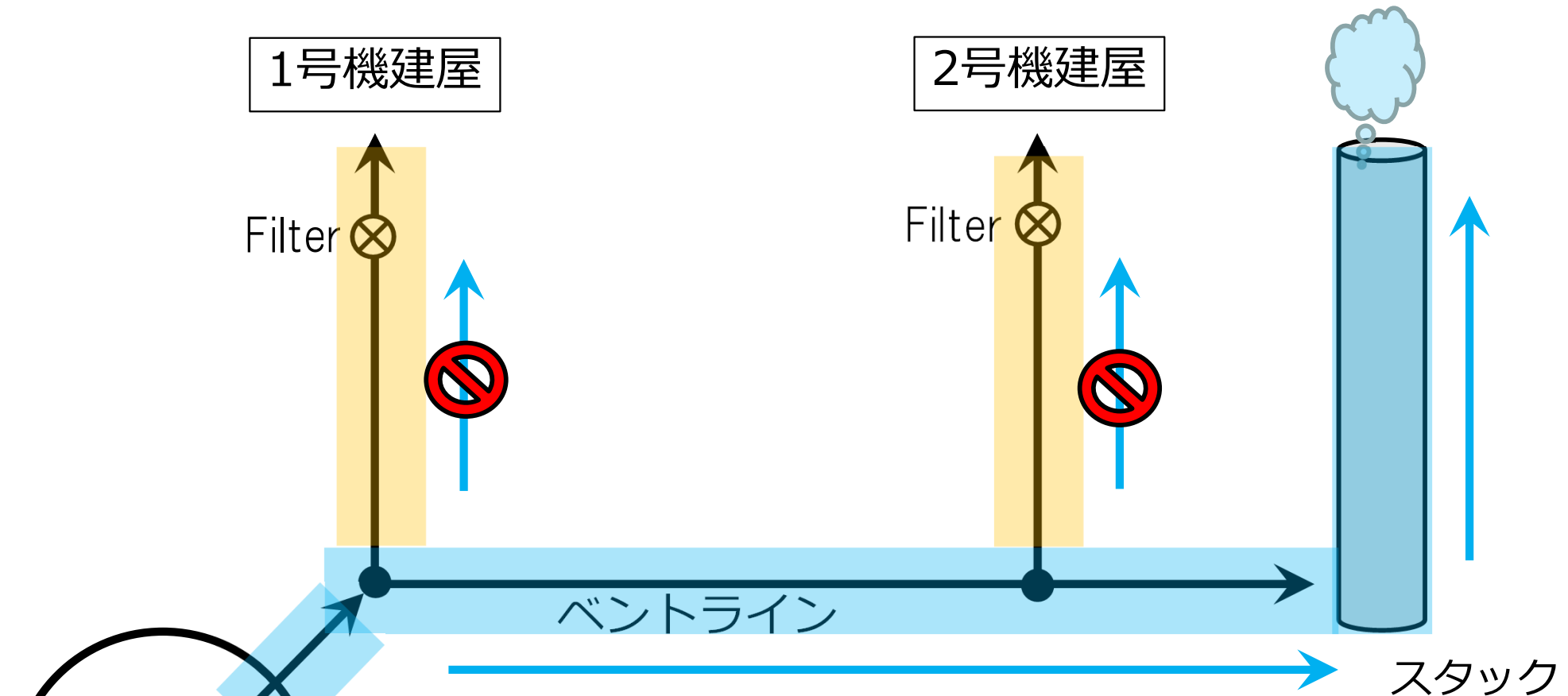


1号機S/C

**フィルタが閉塞しSGTSへの逆流が停止
全ベントガスが122-ventラインを通過してスタックへ**

③ 時間変化を考慮した解析 (4/5)

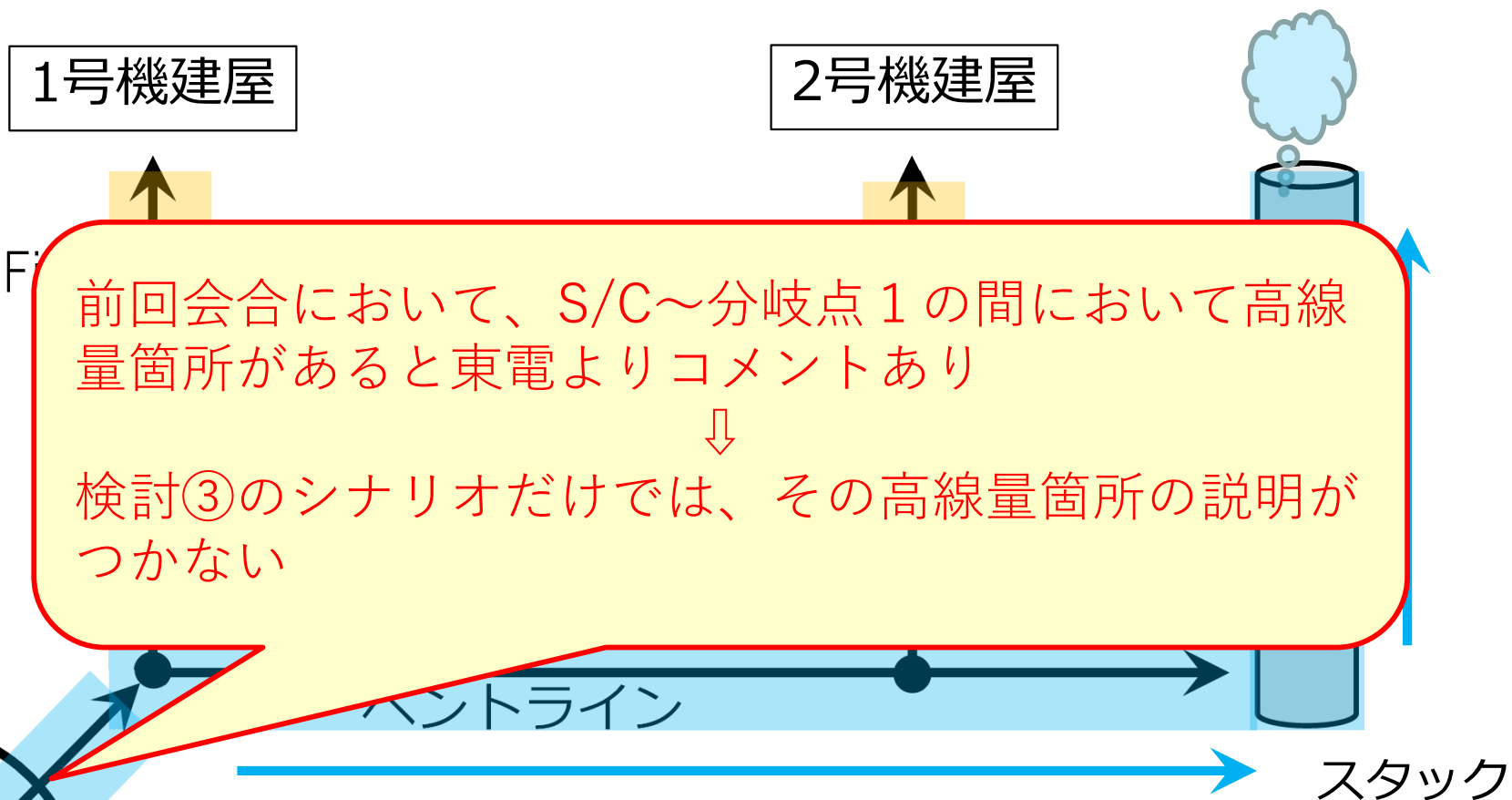
ベント後半



ベントラインとスタックは後半の低濃度Csガスで置換され、SGTS配管には初期の高濃度Csが残留

③ 時間変化を考慮した解析 (4/5)

ベント後半



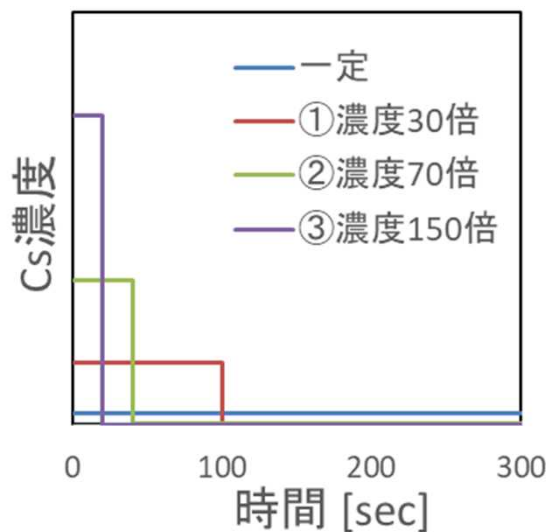
ベントラインとスタックは後半の低濃度Csガスで置換され、SGTS配管には初期の高濃度Csが残留

③ 時間変化を考慮した解析 (5/5)

- Cs濃度を時間変化 (3パターン、左下図)
- 一定量の蒸気 (0.1 kg) がフィルタに到達したら完全閉塞と仮定
- ベントラインよりも2号機SGTSの方が高汚染という状況を再現 (下表)
 - SGTS配管内のCsを維持するためには、フィルタを早く閉塞する必要あり (閉塞蒸気量を1 kgとすると、配管内にCsがほぼ残らない)
 - 1号機SGTSへのCs流入量が小さい (フィルタまでの距離が短く早く閉塞)

RELAP結果： Csの分布 [TBq]

Cs濃度の時間変化
(ベントは3120秒継続)



場所(測定)→ ↓条件	ベントライン (0.1TBq*)	1号配管 (測定なし)	1号フィルタ (10 TBq)	2号配管 (18 TBq)	2号フィルタ (2 TBq)
濃度一定	0.14	0.04	10	0.26	20
①濃度30倍	0.006	0.22	0.9	6.25	2.8
②濃度70倍	0.015	0.50	2.0	11.2	6.4
③濃度150倍	0.007	1.1	4.4	3.70	11
濃度70倍 閉塞蒸気1kg	0.02	0.60	29	0.02	11

*配管含流部を除く

R2年度のJAEA解析の概要

● RELAPコードで耐圧強化ベントラインの熱流動解析を実施

- THALES2のベント流の解析結果（流量と組成）を境界条件に設定
- 配管径、長さ、高さの幾何形状、配管曲がりの圧損係数を入力
- GDの動圧を圧損とし、漏えい面積で流路抵抗を表現

➢ 漏えい面積Aと圧損係数Kとの関係：

$$\Delta P = \frac{1}{2} K \rho V^2, \quad K = \left(\frac{A}{A_{100\%open}} \right)^{-2}$$

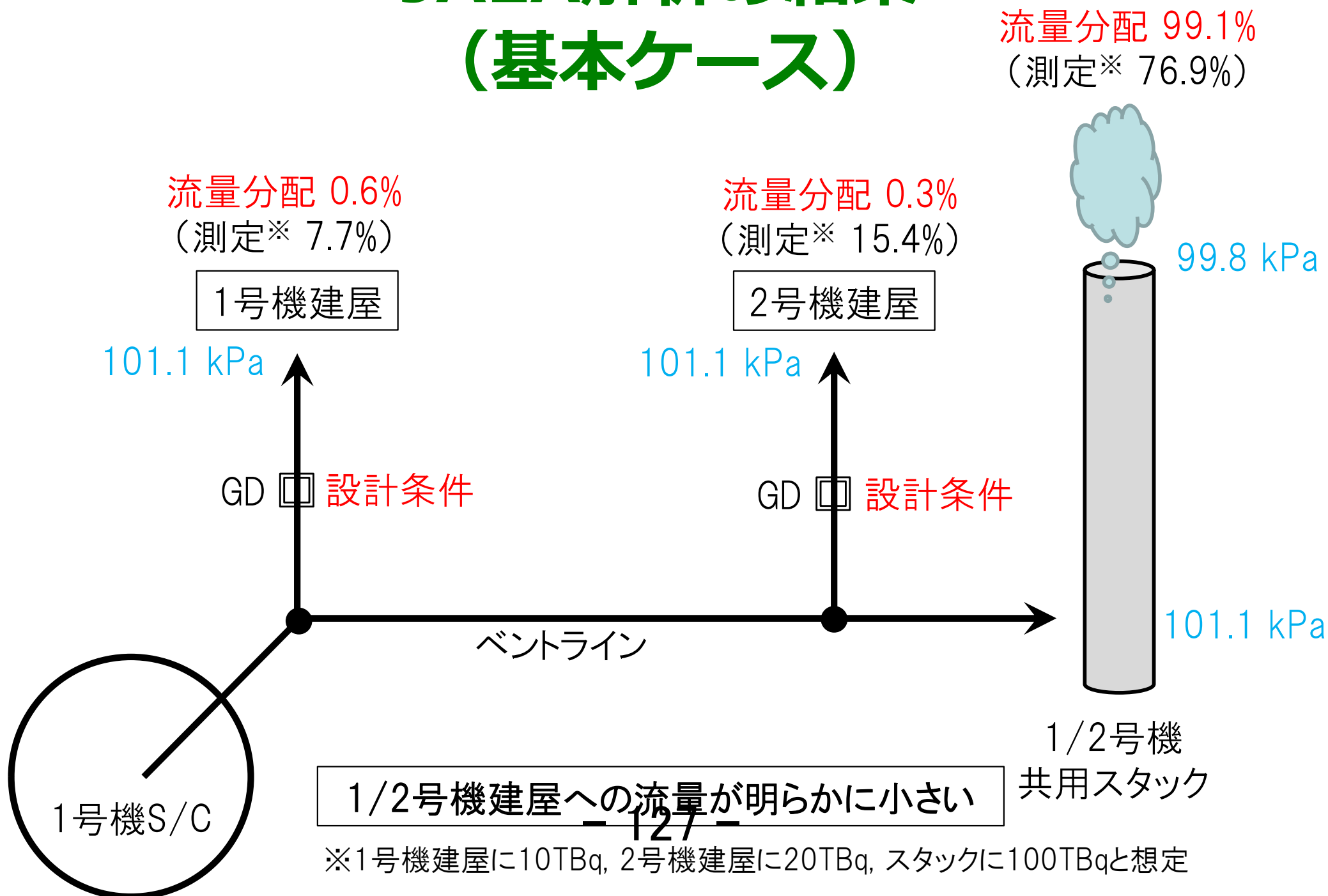
※例えば、漏えい面積1%のとき
K=10000となる計算

- 地表面高さを大気圧とし、境界位置高さで補正した圧力境界
- スタック内の上昇流と下降流を模擬するため2流路でモデル化
 - 1流路ではスタック内に軽いガスが充満し静圧が下がるため逆流が生じない
- ベント開始からベント閉止して約1時間後までを解析

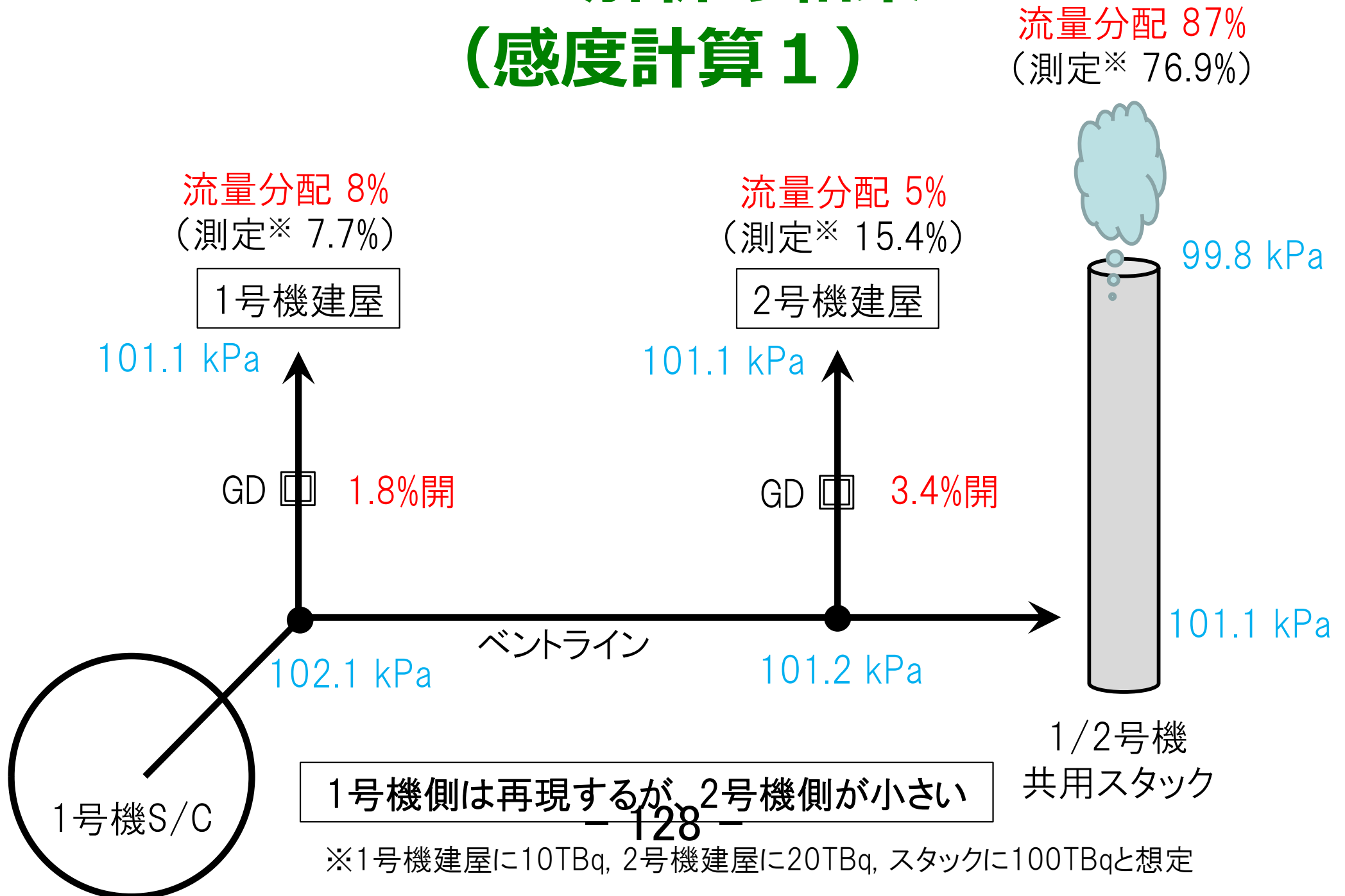
● JAEAの熱流動解析の結論

- 1,2号機のGDの漏えい面積を設計値よりも大きくすることで、1号機建屋への流量配分は測定結果を再現（2号機は測定の1/3程度）
 - GDが設計から想定されるよりも漏えいしていたことが明らかとなった

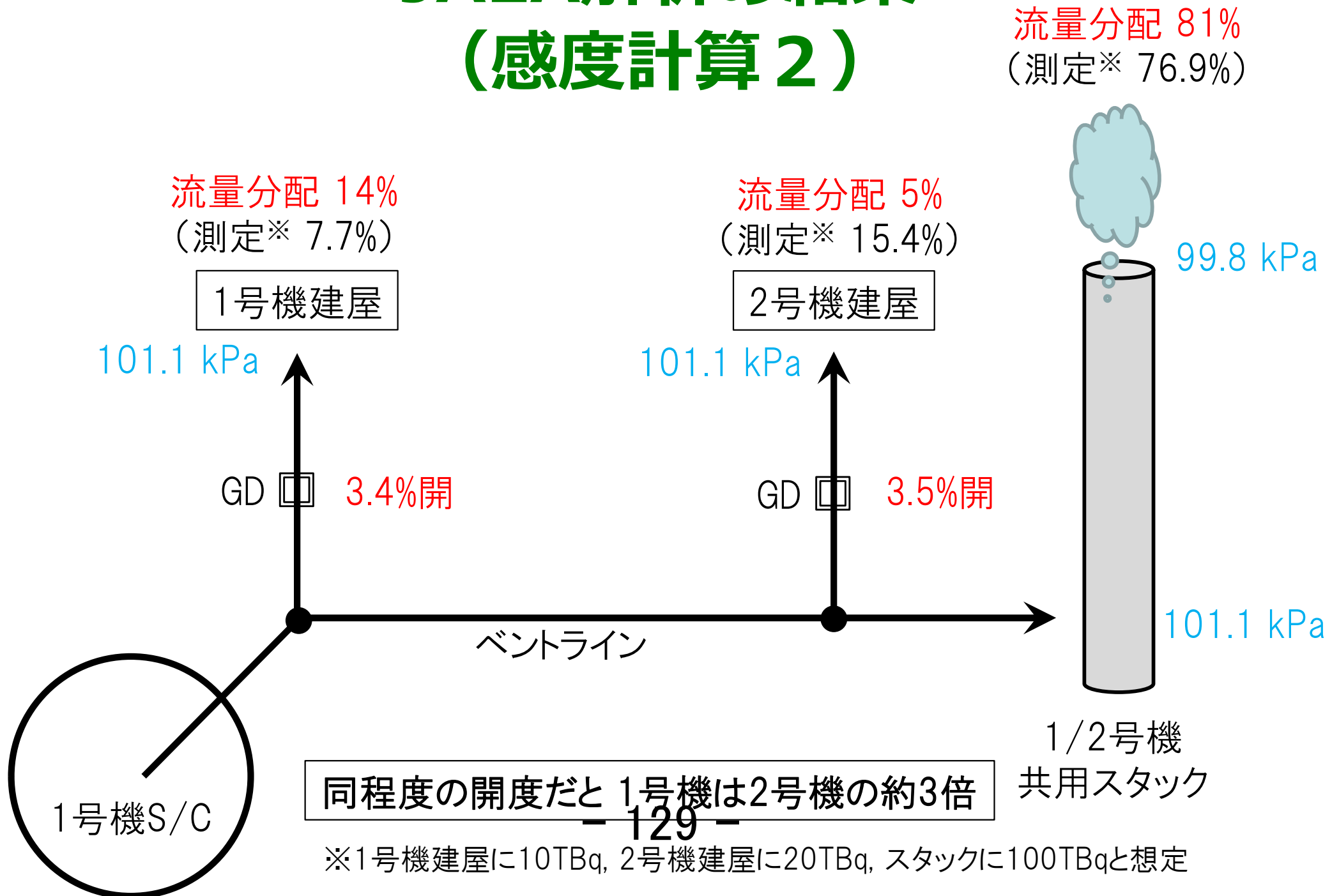
JAEA解析の結果 (基本ケース)



JAEA解析の結果 (感度計算 1)

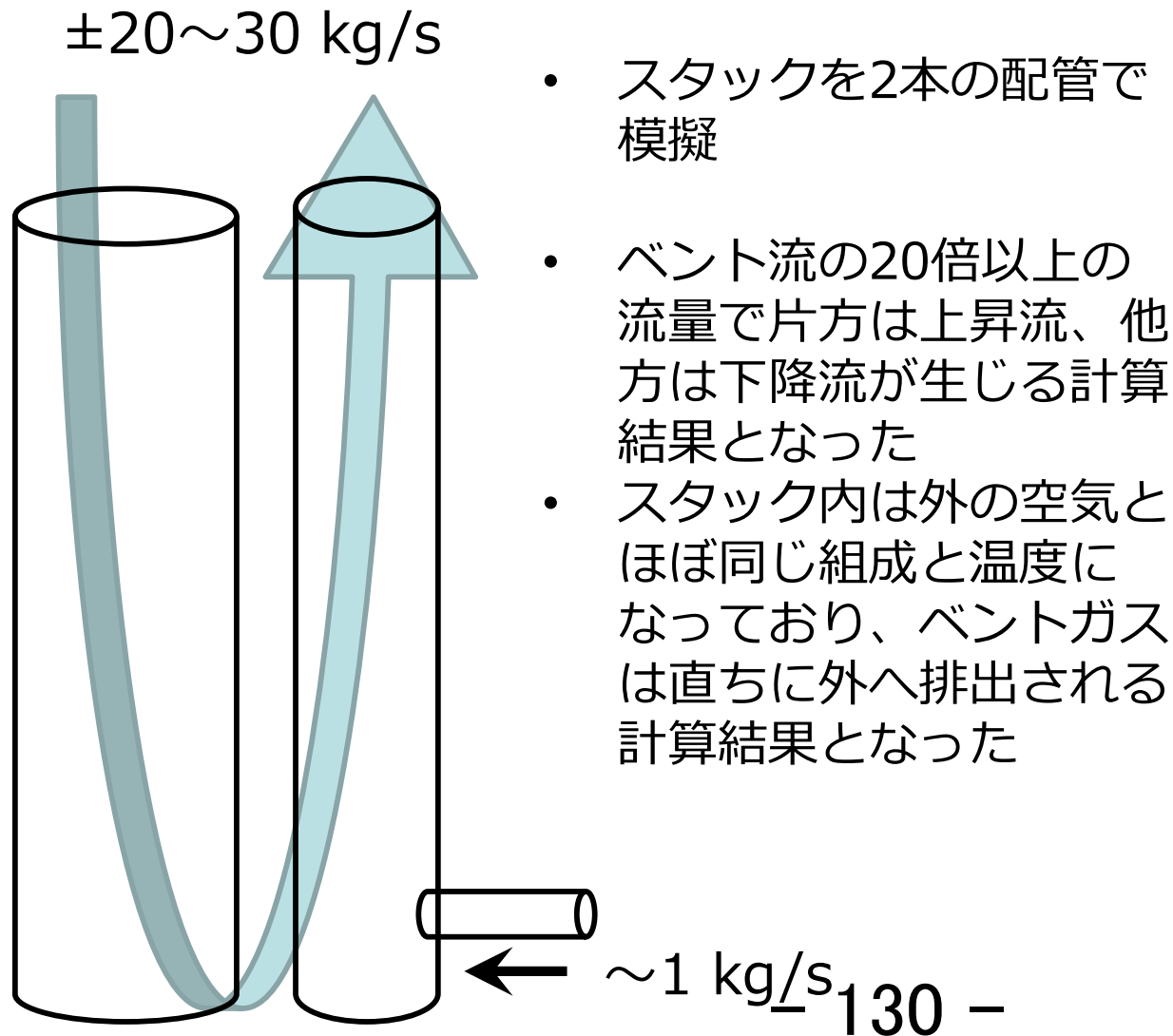


JAEA解析の結果 (感度計算 2)

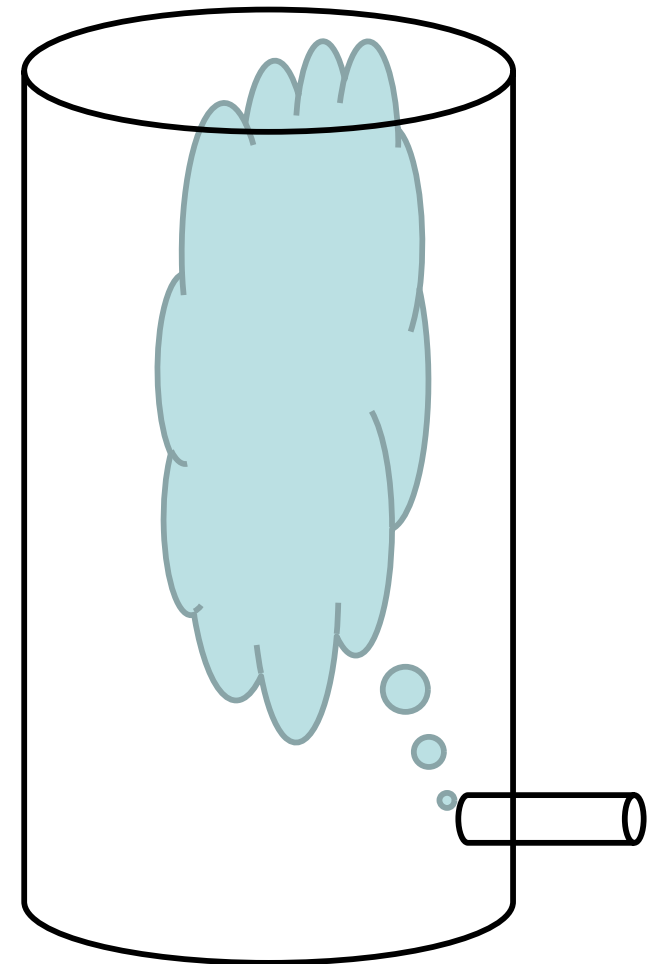


JAEA解析におけるスタック内の流れ

【RELAP解析の結果】



実際は？



R2年度のJAEAの汚染評価

● RELAPの解析結果とSAコード（THALES2, MELCOR等）のモデルで算出した沈着速度 v_{dep} から配管内の汚染量を評価

- 沈着速度を算出するにあたり、THALES2解析結果からエアロゾル径を $1\mu\text{m}$ と仮定し、各経路ごとに評価
 - ベントライン： $v_{dep} = 0.4 \text{ mm/s}$ （乱流沈着、温度泳動）
 - 経路に流入したCsの2% (=2 TBq) が配管内に付着
 - 測定結果 (0.1~0.6TBq) よりも過大な評価結果
 - 分岐点1→1号機送風機： $v_{dep} = 0.1 \text{ mm/s}$ （重力沈降、温度泳動）
 - 経路に流入したCsの2% (=0.2 TBq) が配管内に付着
 - 測定結果なし
 - 分岐点2→2号機送風機： $v_{dep} = 0.12 \text{ mm/s}$ （重力沈降、凝縮拡散泳動）
 - 経路に流入したCsの5% (=0.4 TBq)が配管内に付着
 - 測定結果 (18 TBq~24 TBq) と整合しない

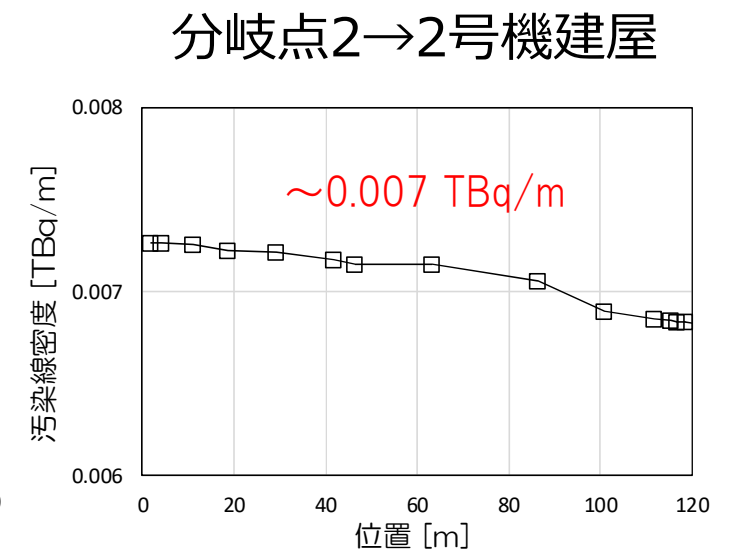
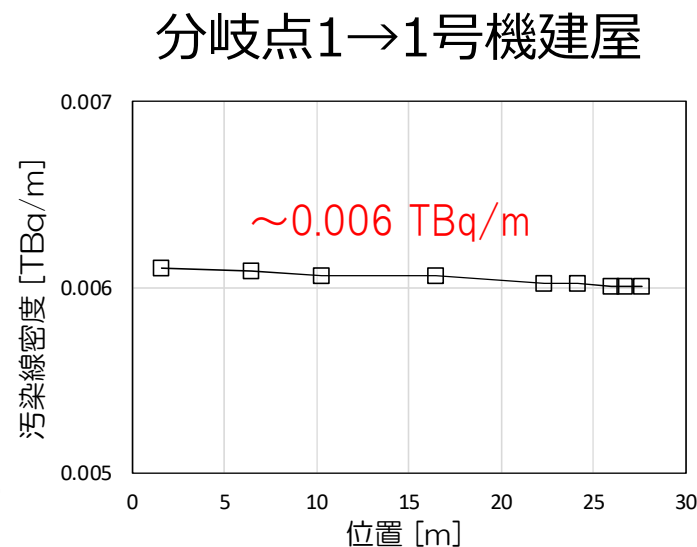
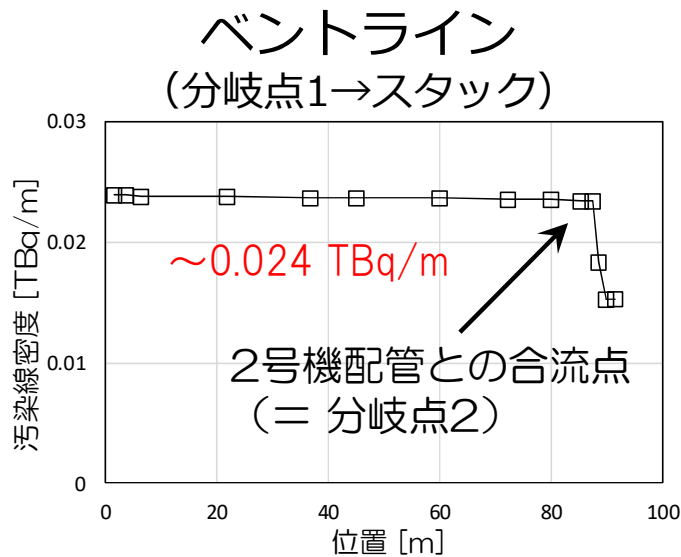
● 昨年度のJAEA汚染評価の結論

- 沈着速度による評価では汚染状況を説明できない
- スタック内に滞留したCsがベン1β閉止後に2号機SGTSへ逆流と考察

JAEA評価の沈着速度による汚染分布

- 単位長さ当たりの付着放射能を算出：
$$-\frac{dN}{dx} = \frac{4v_{\text{dep}}}{Dv_g} N$$

- JAEA評価の沈着速度 v_{dep} 、RELAP解析の気相流速 v_g 、配管径 D 、 $N(x=0)$ として推定Cs量(100 TBq, 10 TBq, 20 TBq)を使用
- 分岐点($x=0$)からの距離と $-dN/dx$ の関係を以下に図示：



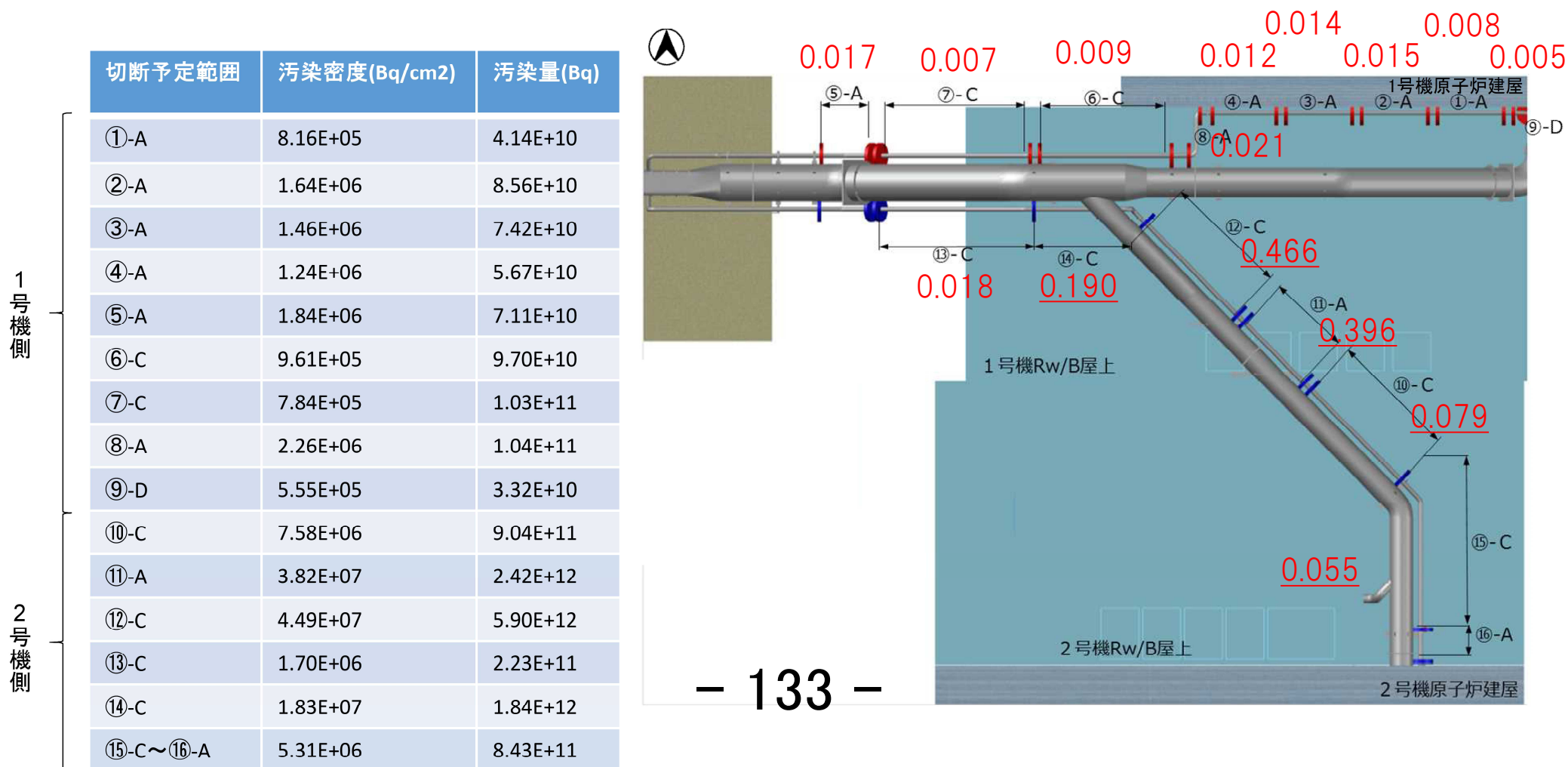
- 沈着速度は各流路の中で一定としたため、変化は小さい

- 沈着や分岐による N の変動等による変化のみ
- 測定で見られた局所的な汚染は、~~自然~~ながら再現できない

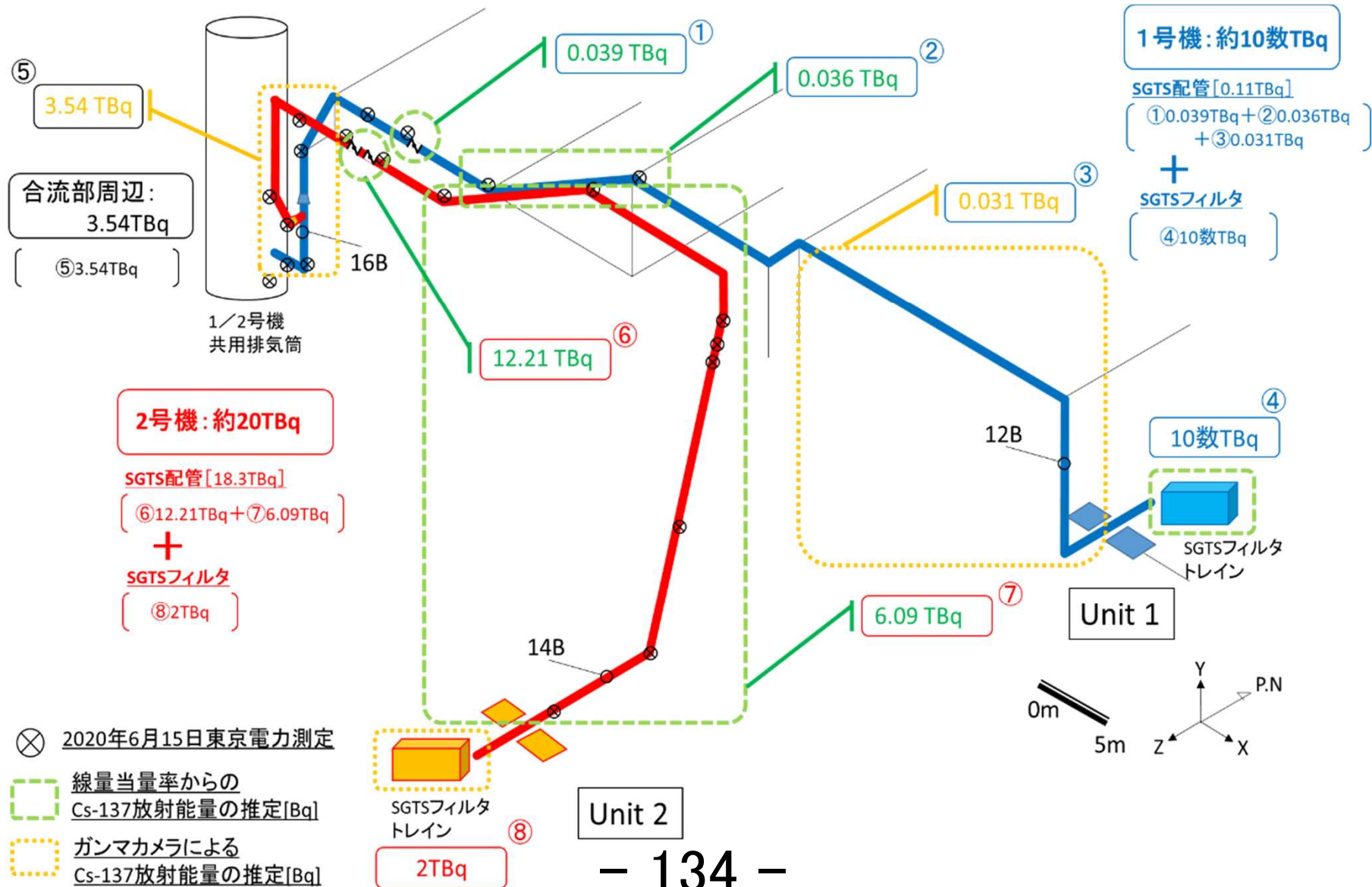
第22回事故分析検討会 資料5-2

東京電力が線量率の測定結果から汚染密度を算出

- 線密度[TBq/m]に換算（下図の赤字の数値）
- JAEA沈着速度による評価： 1号機側0.024 TBq/m, 2号機側0.007 TBq/m
 - 高汚染位置（下図で下線を入れた数値）を除けばオーダは一致



中間取りまとめ 別添3図2



配管曲がりでの汚染

① 下降→水平 (配管曲がりによる流れの向きの変化)

- 顕著な線量増加、上部より底部に汚染 (合流部のみ測定あり)
- 線量の位置依存 (2号機、左下図) : 増加後に指数関数的な減衰

② 斜め下降→水平、水平→斜め下降、水平→斜め上昇

- 線量増加は見られない (むしろ減少?)

③ 水平→水平、斜め上昇→水平、上昇→水平

- 目立った線量増加は見られない (ただし、2号機合流部近くは微妙)

