

1,2号機SGTS配管内汚染の分析

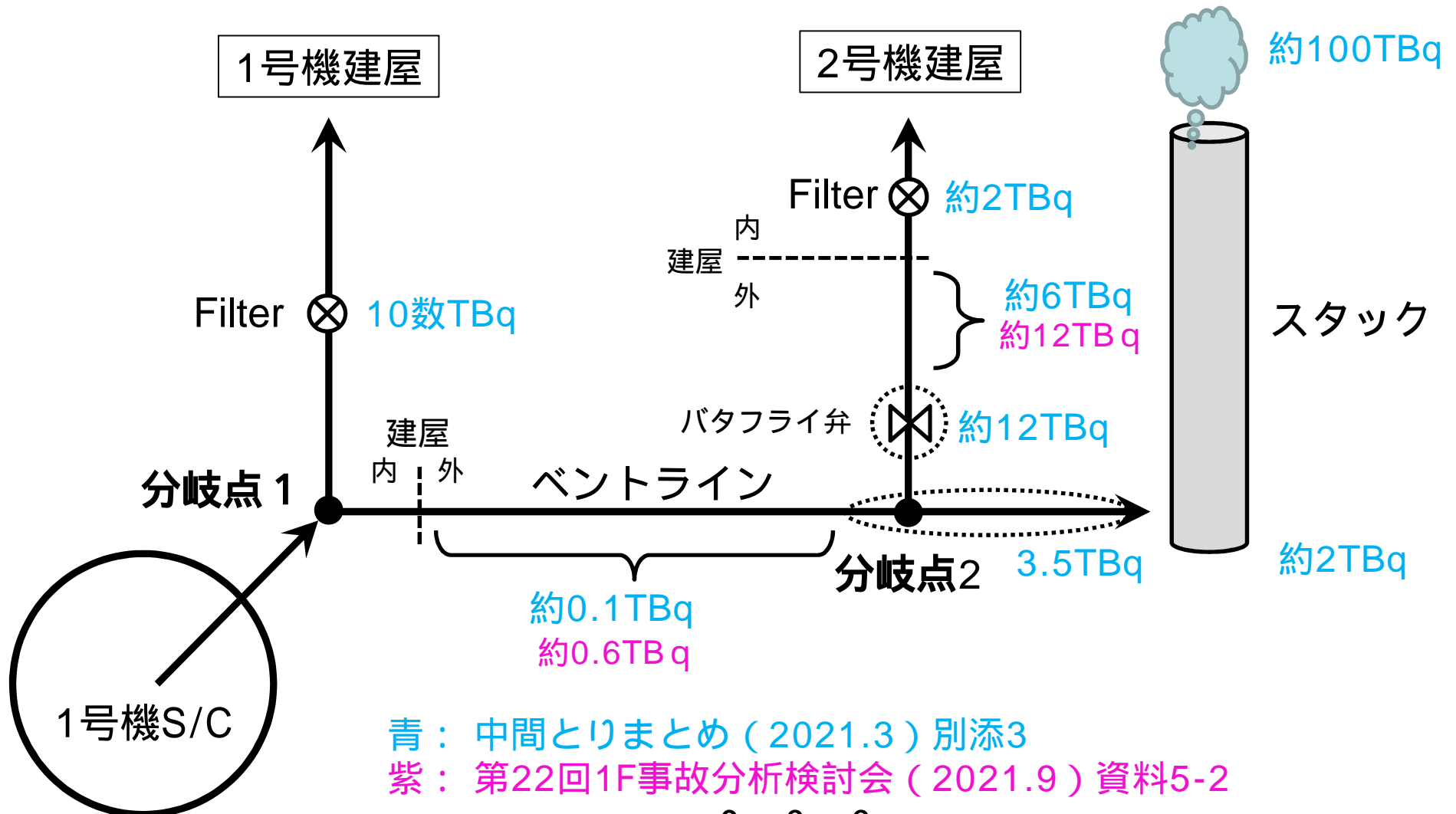
原子力規制庁長官官房技術基盤グループ
システム安全研究部門

令和3年12月21日

はじめに

- 1,2号機SGTS配管の線量測定により、セシウム（Cs）の残留分布が推定されてきた
- 大半のベントガスが通過したベントラインが低汚染な一方で、1,2号機のSGTS配管・フィルタで高汚染となる等、その分布に至る原因が解明されていない
 - 昨年度JAEAが熱流動解析による検討を行ったが解明には至らず
- **NRAで、RELAP熱流動解析による原因分析を継続**
 - 検討 流量配分の再現解析
 - 検討 凝縮と汚染分布の対応
 - 検討 時間変化（流動状態とCs濃度）を考慮した解析
- **検討結果を踏まえ、今後の現場測定に期待すること**

測定結果に基づく推定Cs分布

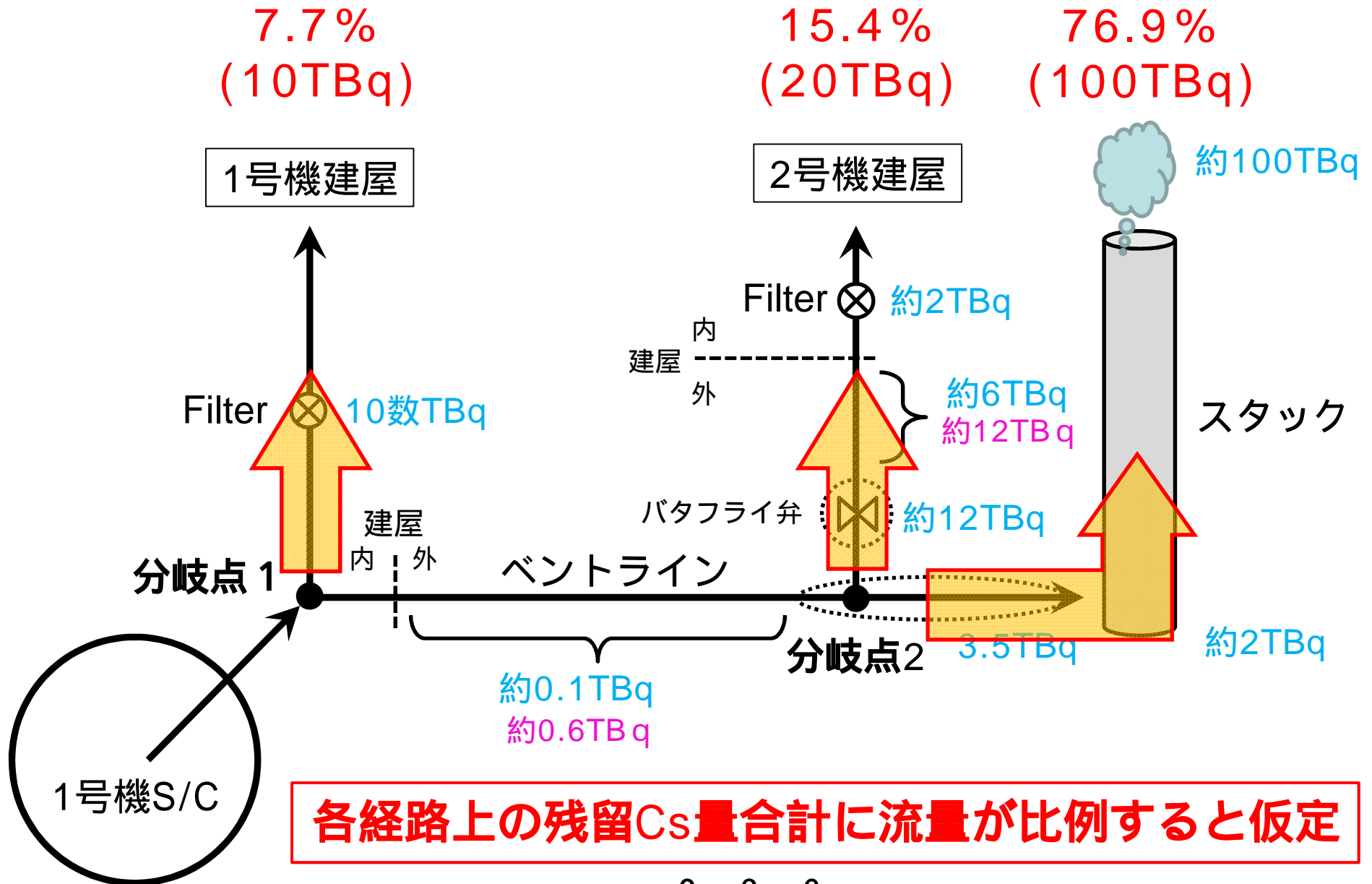


この検討で解決したい問題

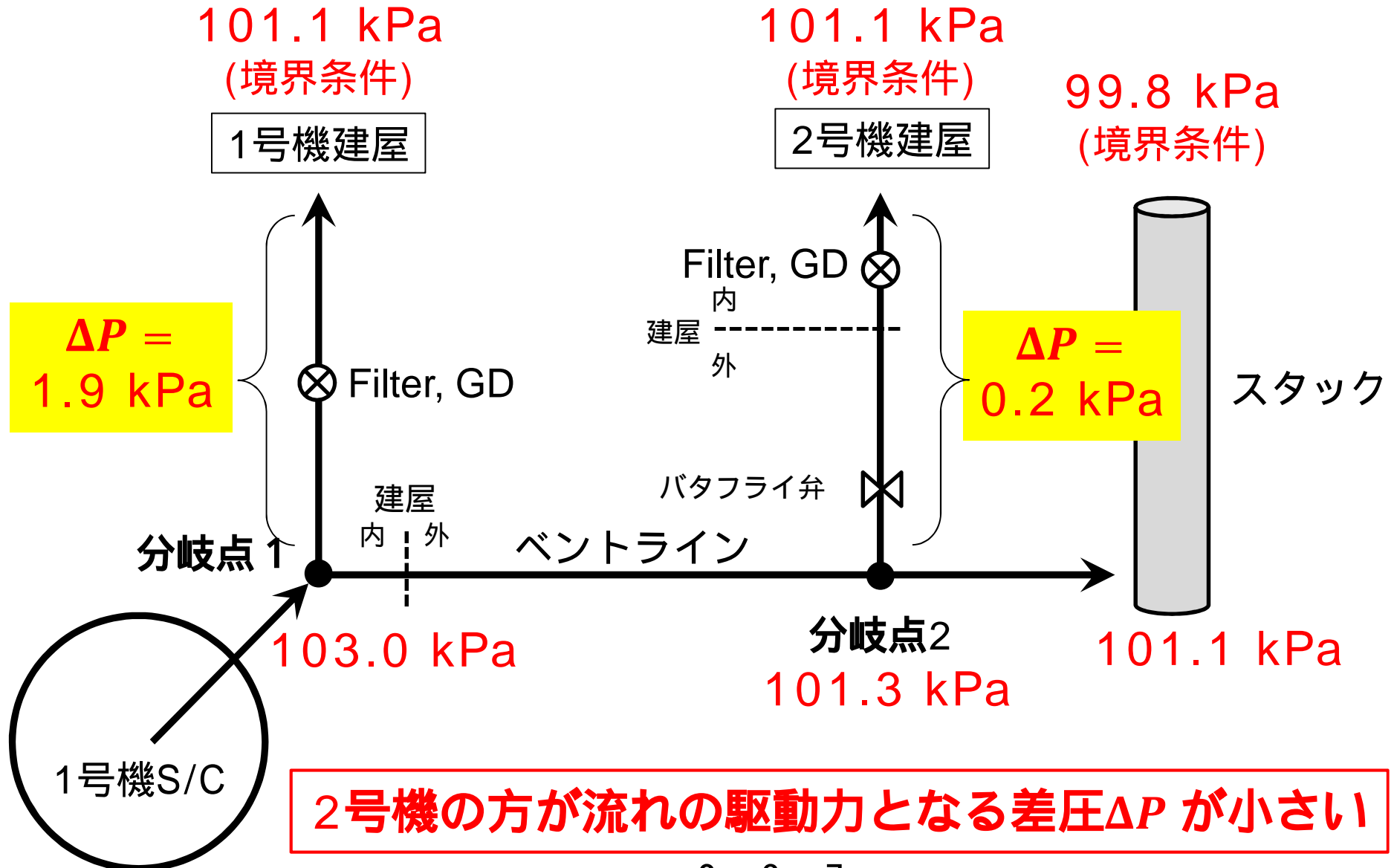
- **ベントガスが1,2号機SGTS配管へと逆流した原因は？**
(1,2号機SGTSの状態がどうであったか？)
 - 昨年度のJAEAの検討では、グラビティダンパ（GD）が公称値どおり機能すれば十分な逆流が生じないこと、GDの漏えい面積を変化させることで十分な逆流が生じうることを確認した
 - 検討：熱流動解析で、測定結果から推定される逆流量となるような条件を評価し、GD等の状態について推定を行う
- **なぜ大半のベントガスが通過したベントラインよりも2号機SGTS配管の方が高汚染となったか？**
 - 昨年度のJAEAの検討では、沈着速度モデルによる汚染分布の評価等を行い、測定結果とは整合しないことを確認した
 - 検討：蒸気凝縮の発生位置と汚染分布との対応を確認
 - 検討：ベント中に流動状態とCs濃度が時間変化するシナリオで再現できないか検討

検討 流量配分の再現解析

流量配分の再現解析 (1/4)



流量配分の再現解析 (2/4)



流量配分の再現解析（3 / 4）

- JAEAのRELAPインプットを用いて解析（一部修正）
- 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
 - 1号機建屋の高圧化
 - 2号機建屋の負圧維持
 - 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
 - スタックで大きな流動抵抗（圧損係数）が生じた可能性あり
 2. 経路上にある流動抵抗
 - 1,2号機SGTS：GDとSGTSフィルタの圧損が支配的
 - ベントライン：配管壁での摩擦圧損（=分岐点1と2の圧力差）
- 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

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

（密度 ρ , 流速 V ）

流量配分の再現解析（4 / 4）

- 1,2号機GD+SGTSフィルタの圧損係数の評価結果

仮定	1号機	2号機
ノミナル条件	3460	47
1号機建屋圧力 +1 kPa	977	47
スタック圧損係数10倍	5102	865
2号機建屋圧力 -0.06 kPa	3460	116

GD圧損係数の設計値: 1号機 2.8×10^4 , 2号機 1.1×10^5

- SGTSへの十分な逆流: GDが設計値どおり機能しない
- 2号機の方が圧損係数が1 ~ 2桁小さい
 - 2号機のGDの方が1号機より流れやすい状態であった可能性
 - GDの圧損係数が1,2号機で同程度だとすると、1号機でフィルタの目詰まり等のGD以外の圧損要素が生じていた可能性
 - 出口圧力、スタック圧損を変えても、2号機の圧損係数が小さい

検討 凝縮と汚染分布の対応

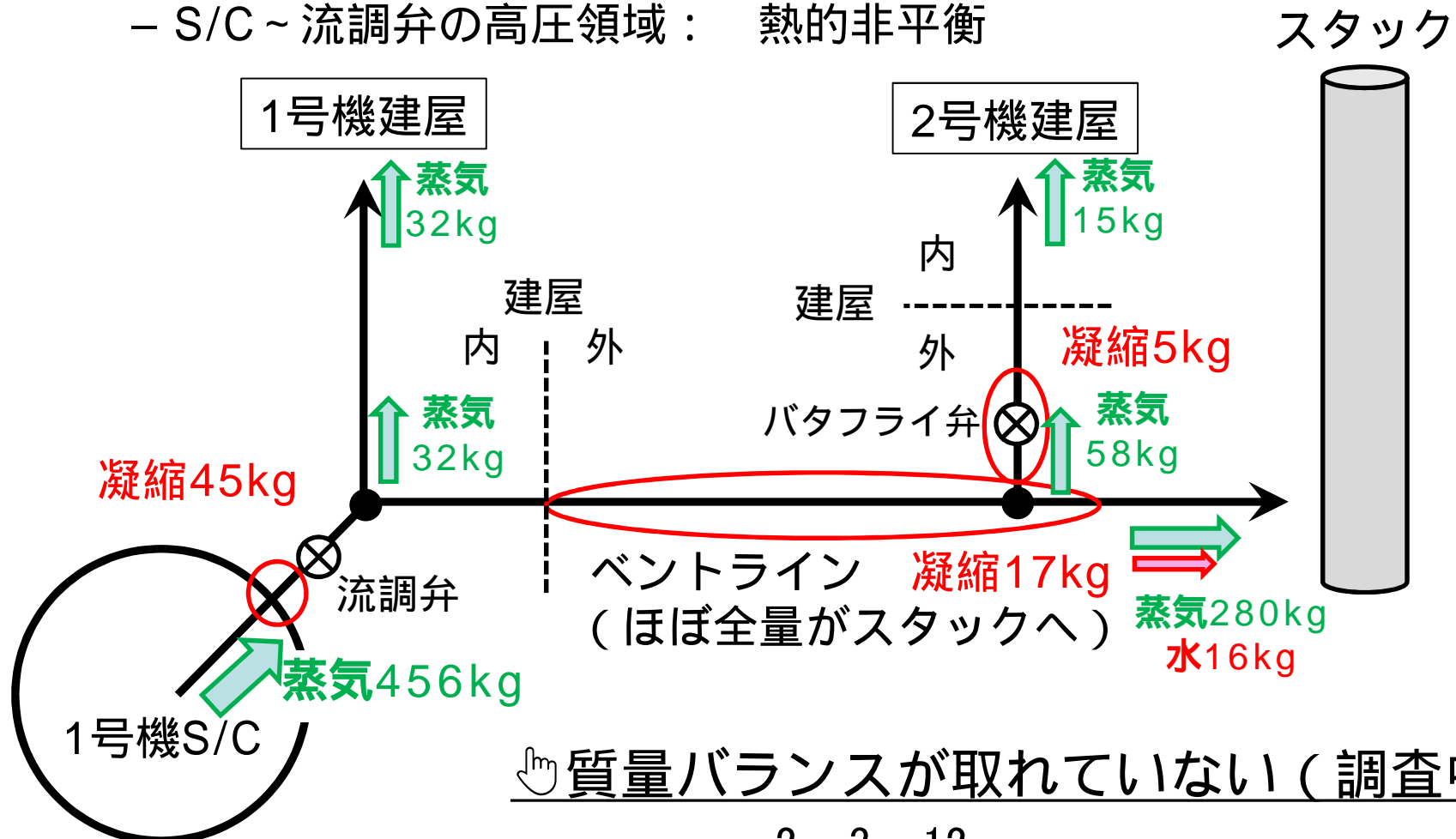
凝縮と汚染分布の対応（1/3）

- 検討 では、ベントラインからSGTSへの逆流量のみに注目
- ベントガス中のCsが経路途中に残留した原因として、蒸気凝縮で発生した水が影響した可能性がある
 - RELAP解析で蒸気凝縮の発生位置・量、凝縮水の移動を評価
 - 高汚染箇所と凝縮との対応を確認する

凝縮と汚染分布の対応 (2/3)

凝縮の発生位置・量 (下図: RELAP解析の結果)

- 建屋外の配管: 2号機バタフライ弁前後、ベントライン
 - ベントラインで凝縮した水はほぼ全量スタックへ流出
- S/C ~ 流調弁の高圧領域: 熱的非平衡



凝縮と汚染分布の対応（3/3）

- **高汚染の2号機SGTSと低汚染のベントラインで凝縮が発生**
 - いずれも建屋外（配管外側が低温）
 - 「凝縮発生位置 = 高汚染位置」とは言えない
 - ベントラインの凝縮水はスタック方向に流されており、最終的な凝縮水の位置と高汚染位置とが対応している可能性あり
- **S/C～流調弁で凝縮が発生**
 - 凝縮水のたまり場があれば高線量となっている可能性あり
- **質量バランスが取れていない**
 - 主成分である非凝縮性ガスの質量バランスは崩れておらず、流量配分の再現解析の結果には大きく影響しないと考える
 - 凝縮量の絶対値は信用すべきでないが、凝縮発生位置や発生量の相対関係といった定性的な傾向確認に使うことは可能と考える
 - 旧バージョンのRELAPでは質量バランスが取れている

検討 時間変化（流動状態とCs濃度） を考慮した解析

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**

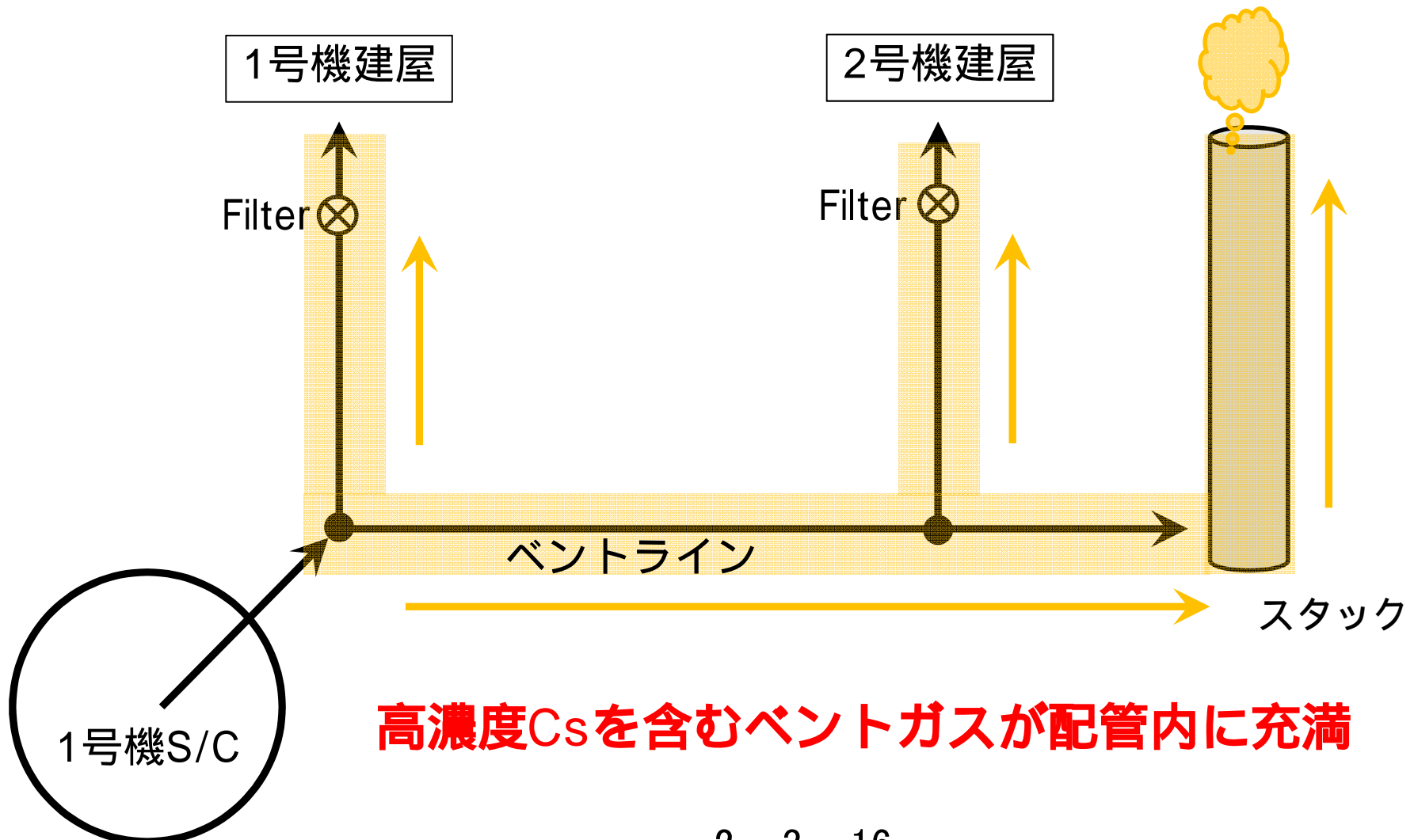
- SGTSのフィルタライン（HEPAフィルタ）に蒸気が流入すると、水で目詰まりを起こし得る
- Cs濃度はベント直後は高く、その後低下する
 - S/CにたまっていたCsがベント初期に放出されるため

- **2つの時間変化の組合せを考慮することで、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た可能性はないか？

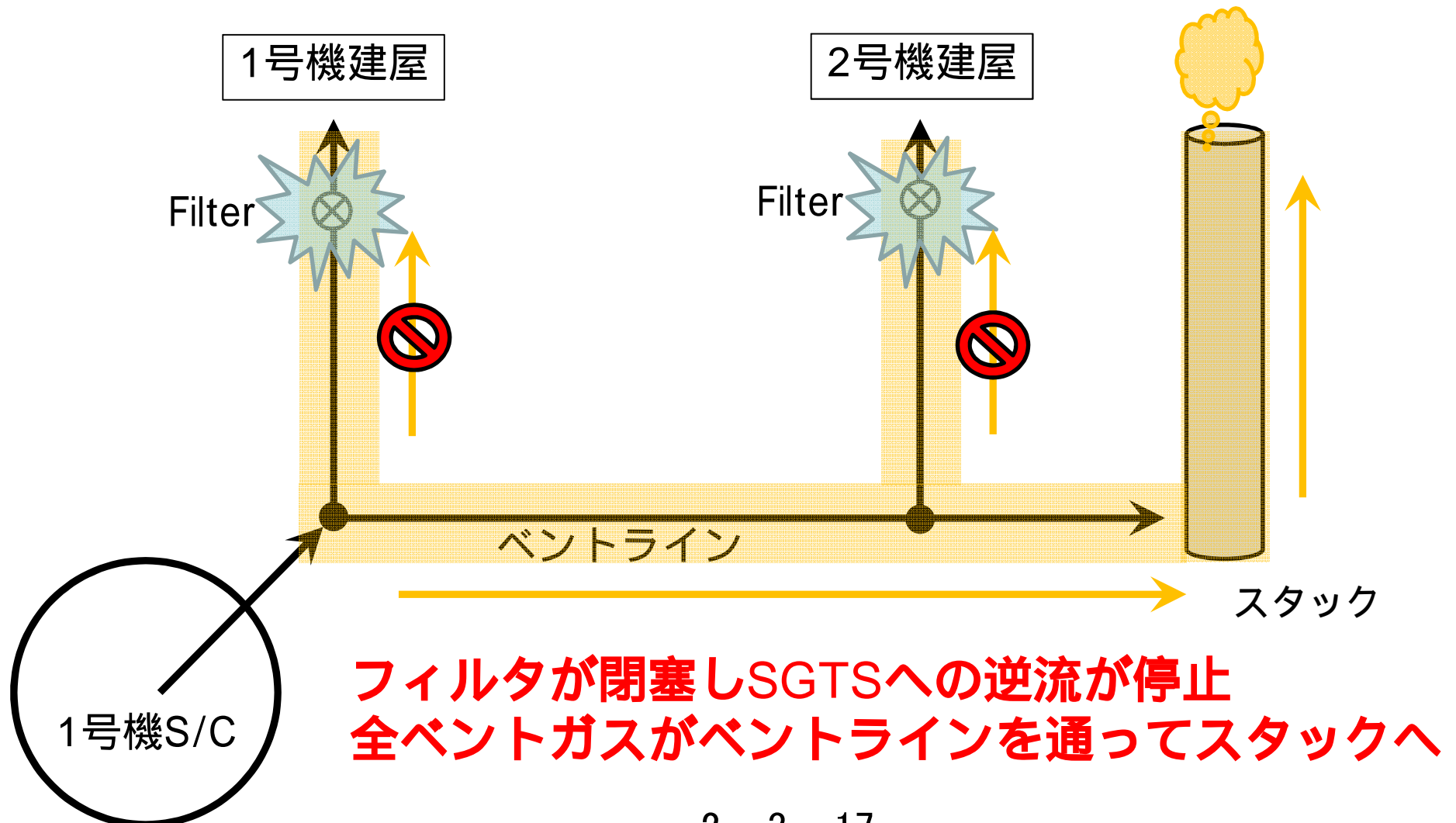
時間変化を考慮した解析 (2/5)

ベント初期



時間変化を考慮した解析 (3/5)

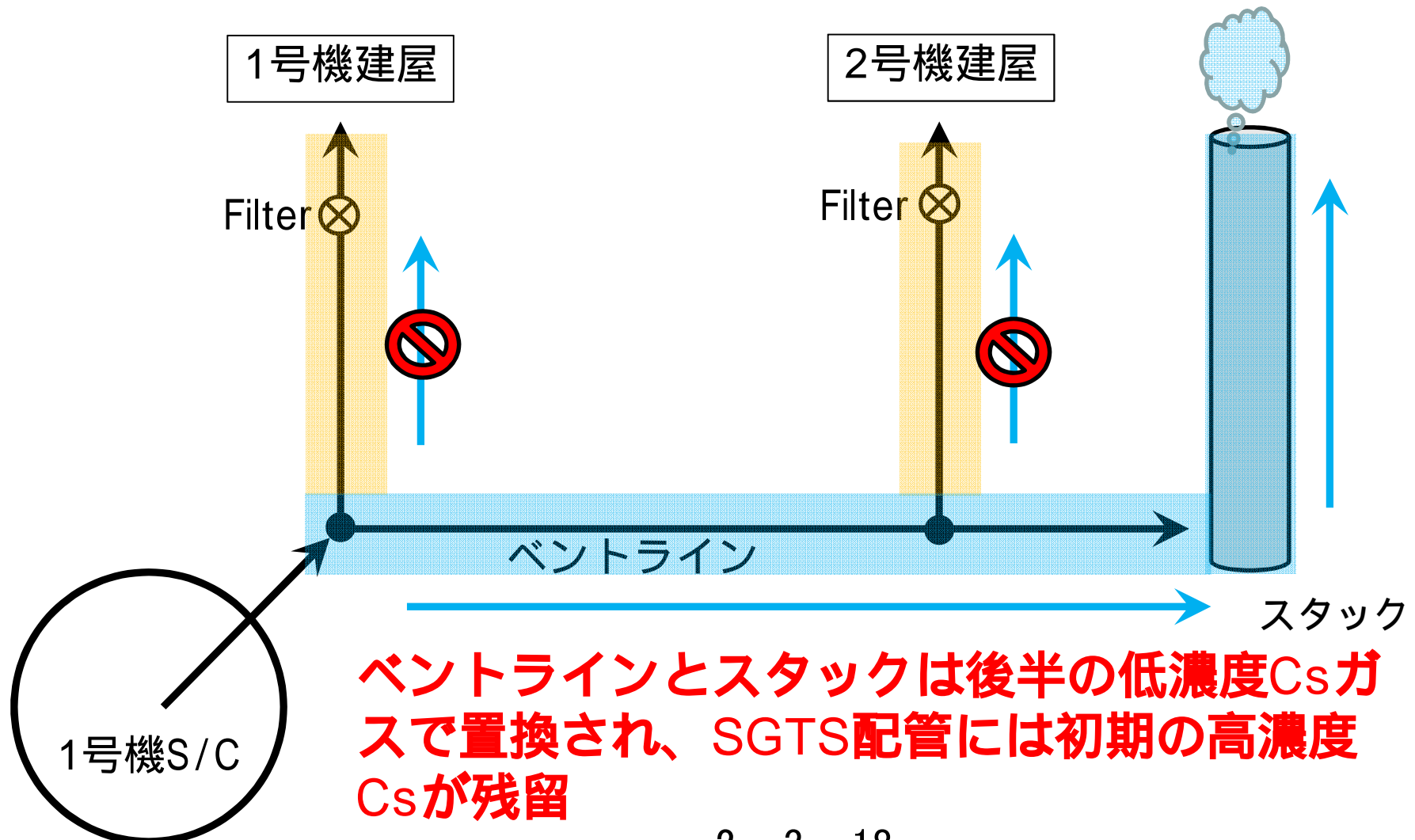
フィルタが水で目詰まり



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

時間変化を考慮した解析 (4/5)

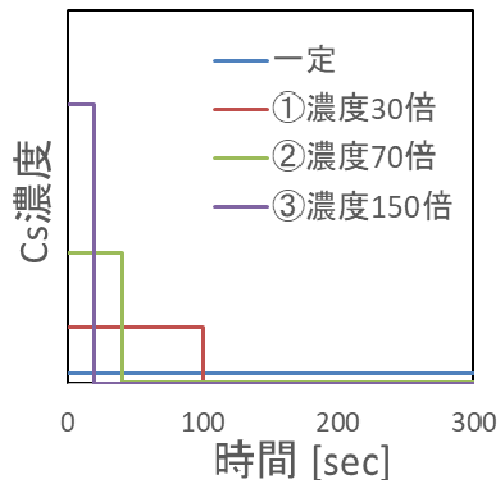
ベント後半



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 (0.1 kgの蒸気がフィルタを通過したときに完全閉塞としている)
 - このシナリオが正しいとすると、S/C ~ 分岐点 1 も低汚染となるため、その領域の線量測定でシナリオ成立性を確認できるかもしれない

Cs濃度の時間変化
(ベントは3120秒継続)



RELAP結果 : Csの分布 [TBq]

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	0.12	0.04	10.0	0.26	19.8
濃度30倍	0.07	0.23	0.9	4.52	2.6
濃度70倍	0.17	0.54	2.0	3.78	5.5
濃度150倍	0.34	1.14	4.4	2.37	6.6

* 配管合流部を除く

RELAP熱流動解析の結論

流量配分の再現解析

- 十分な逆流：1/2号機GDが設計値どおりに機能しない
- 2号機SGTSの方が1号機より圧損係数が1.2桁小さい
 - 2号機SGTSの駆動力（圧力差）が小さいことに起因

凝縮と汚染分布の対応

- 建屋外にあるベントラインと2号機SGTSで凝縮発生
 - 凝縮が発生しているベントラインは低汚染であり、「凝縮発生位置 = 高汚染位置」は成り立たない
 - ベントラインの凝縮水はスタックに流されており、最終的な凝縮水の位置と高汚染位置とが対応している可能性はあり
- S/C ~ 流調弁でも凝縮発生：残留凝縮水があれば高線量の可能性

時間変化（流動状態とCs濃度）を考慮した解析

- 初期にCsが高濃度、フィルタが蒸気で完全閉塞するとして解析
- ベントラインよりも2号機SGTSが高汚染という状況を再現

現場測定に期待すること

汚染分布の分析状況

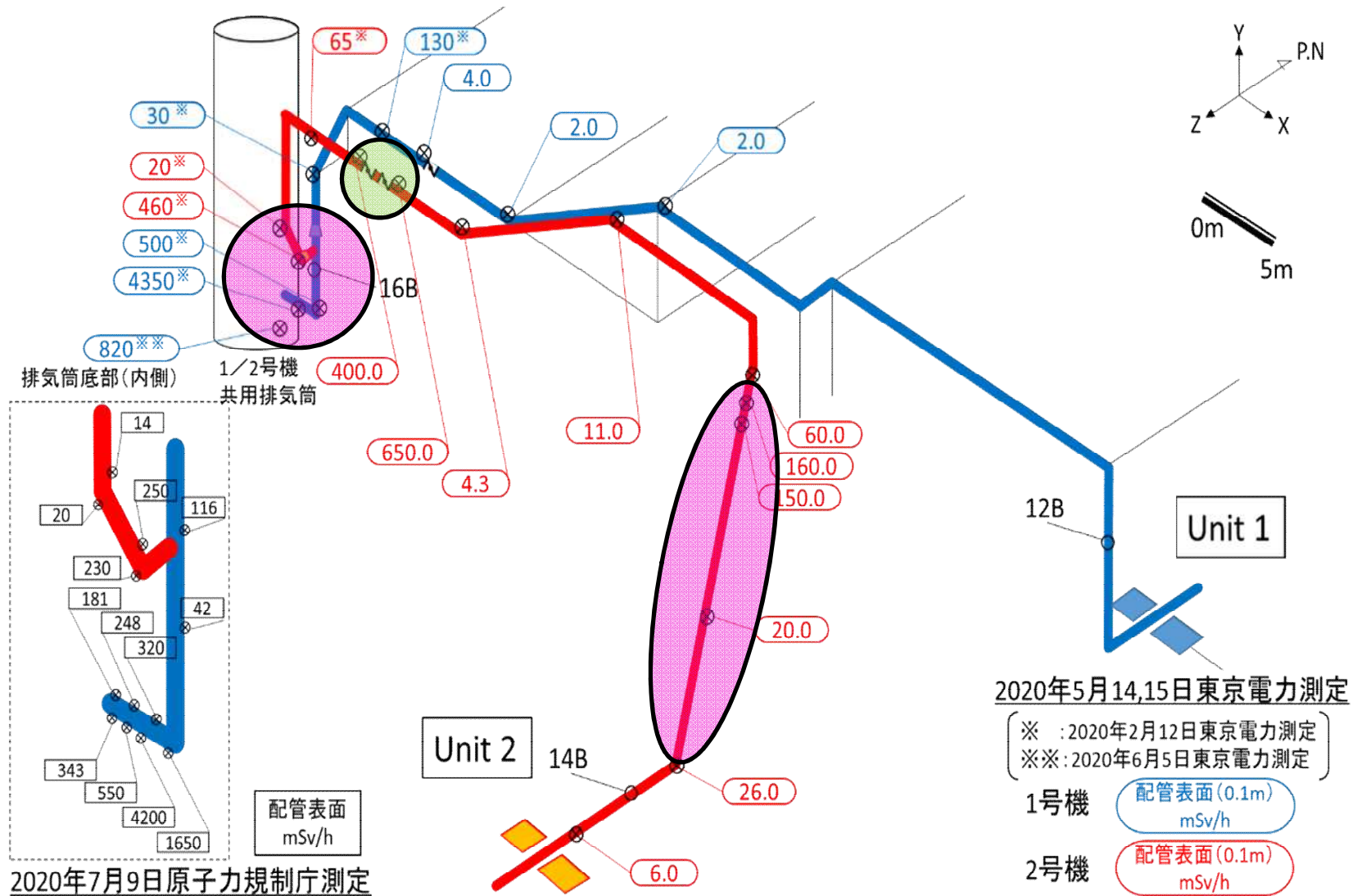
• 中間とりまとめ（2021.3）での検討結果

- 線量測定値や放射能の推定分布を提示（中間とりまとめ別添3）
- 汚染分布に対する分析・整理（中間とりまとめ1.2（2））
 - ベントに成功していない2号機SGTS配管の下流部分（SGTS配管合流部に近い配管）の方が、ベントに成功した1号機のSGTS配管（SGTS配管合流部に近い配管）よりも汚染の程度が高い
 - 1号機SGTSフィルタトレインは、2号機SGTSフィルタトレインよりも汚染の程度が高い
 - 1,2号機共用排気塔（スタック）の底部の汚染の程度が高い

• 測定結果から線量分布を再整理（次ページ以降）

- 高汚染箇所の特徴
- 高汚染箇所と低汚染箇所との相違点 等

中間取りまとめ 別添3図3



汚染分布の特徴

• 高線量箇所（3か所）の整理

– 2号機バタフライ弁

➢ 低線量の1号機のバタフライ弁との違い

- 流速： 1号機 30m/s、2号機 4m/s
- 弁数： 1号機 1弁、2号機 2弁
- ディスクの向きは1,2号機で同じか？（衝突面積の差）

– L字管（下降流 水平流）

➢ 1・2号機の合流部～スタック接続部

- 流速20 30m/s、落差5m
- 水平管の上側より底部で線量が高い

➢ 2号機配管

- 流速 4m/s、落差1.2m
- 下流に向けて線量が指数関数的に減衰



• 上記以外では薄く均質に汚染

– 測定：ベントラインで約0.01TBq/m、2号機SGTSで約0.02TBq/m

➢ JAEA沈着速度評価：ベントライン0.024TBq/m, 2号0.007TBq/m

➢ オーダー一致：SAコードの汎用的な計算モデルで評価できる可能性あり

今後の測定で期待すること

• ここまでの検討から、今後の調査で期待する測定場所

– GD

- 1号機と2号機とでGDの状態に違いがあるか
- 本当に十分な逆流を許してしまうような状態であるのか
- GDの汚染状況

– SGTSフィルタトレイン

- 水がたまっているかどうか（水による目詰まりの可能性）

– 1,2号機バタフライ弁

- 1,2号で開状態（ディスクの向き）に違いがないか
- 2号機の汚染状況（どちらの弁が高汚染か等）

– 2号機SGTS配管のL字管（下降 水平）

- 水平部の上部と底部での汚染の差異

– 1号機のS/C～流調弁（分岐点1）

- RELAP解析では大量の凝縮が生じており、残留した凝縮水による高汚染の可能性
- 時間変化考慮のシナリオが正しいとすると、この領域は低汚染のはず

参考

昨年度のJAEA解析の概要

• RELAP5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：

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

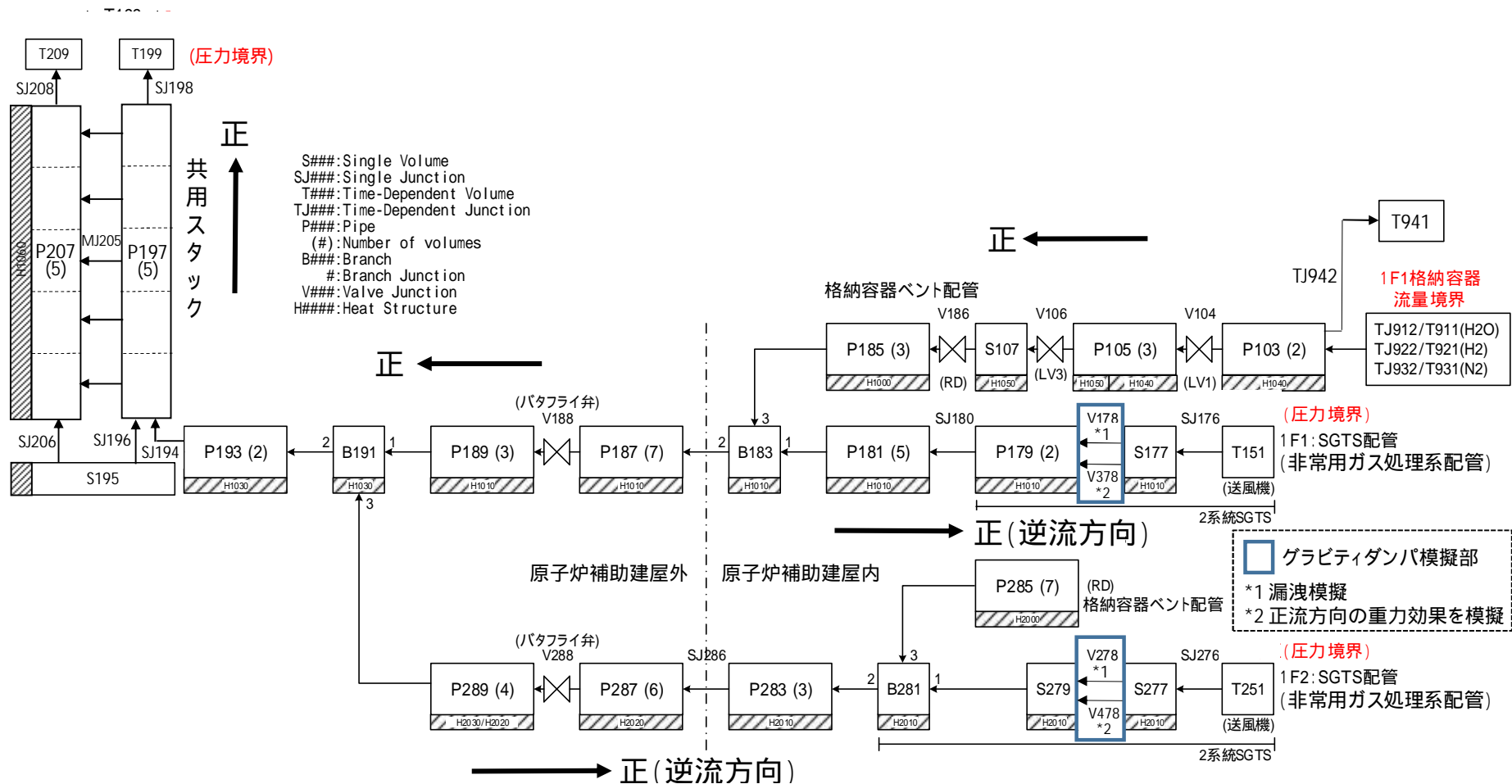
例えば、漏えい面積1%のとき
K=10000となる計算

- 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2号機へ流れない
- 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

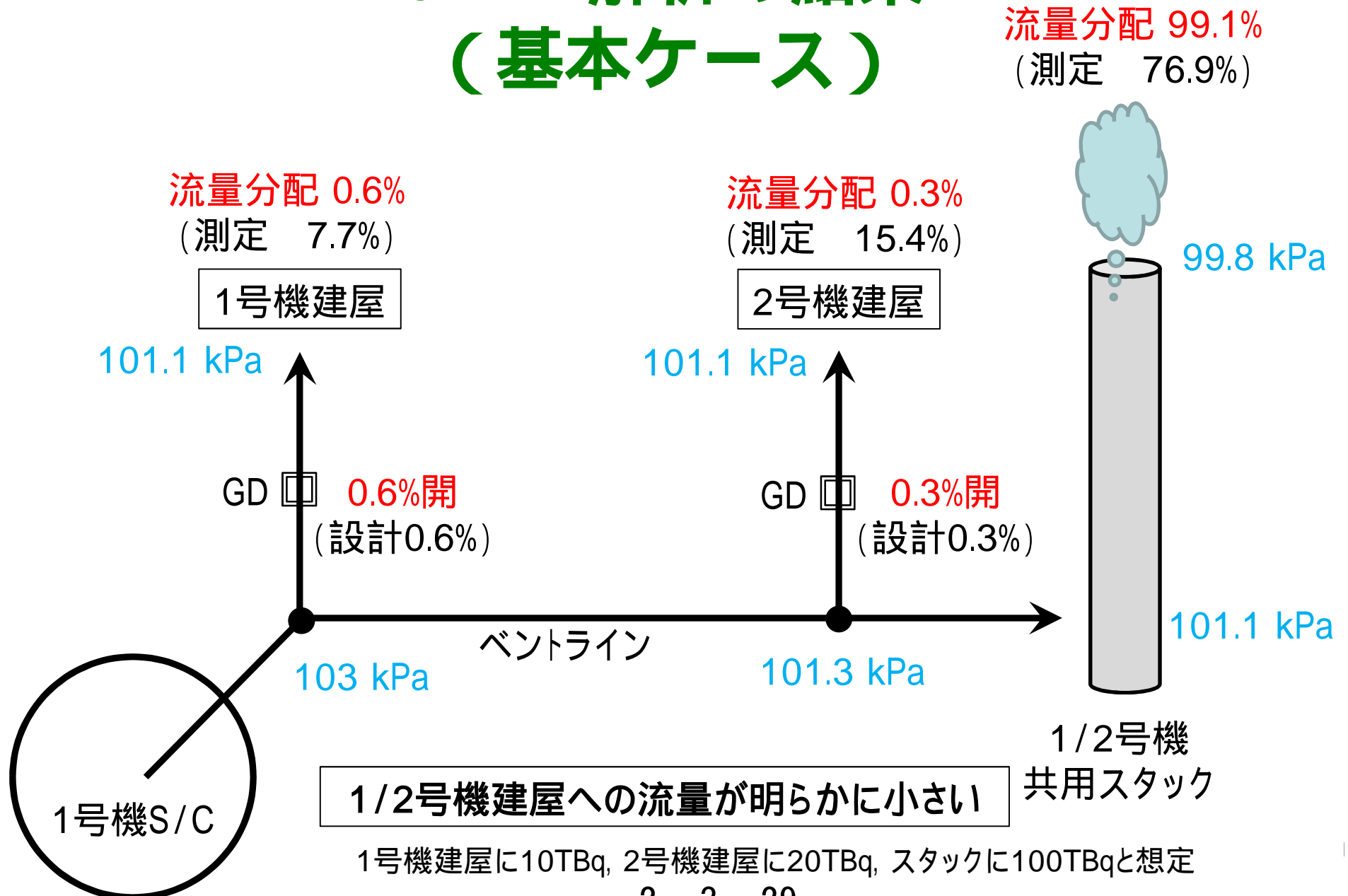
- 1,2号機のGDの漏えい面積を設計値の3倍, 11倍とすることで、1号機建屋への流量配分は測定結果を再現、2号機は測定値の1/3
 - GDが設計から想定されるよりも漏えいしていたことが明らかとなった

RELAP解析のノーディング図

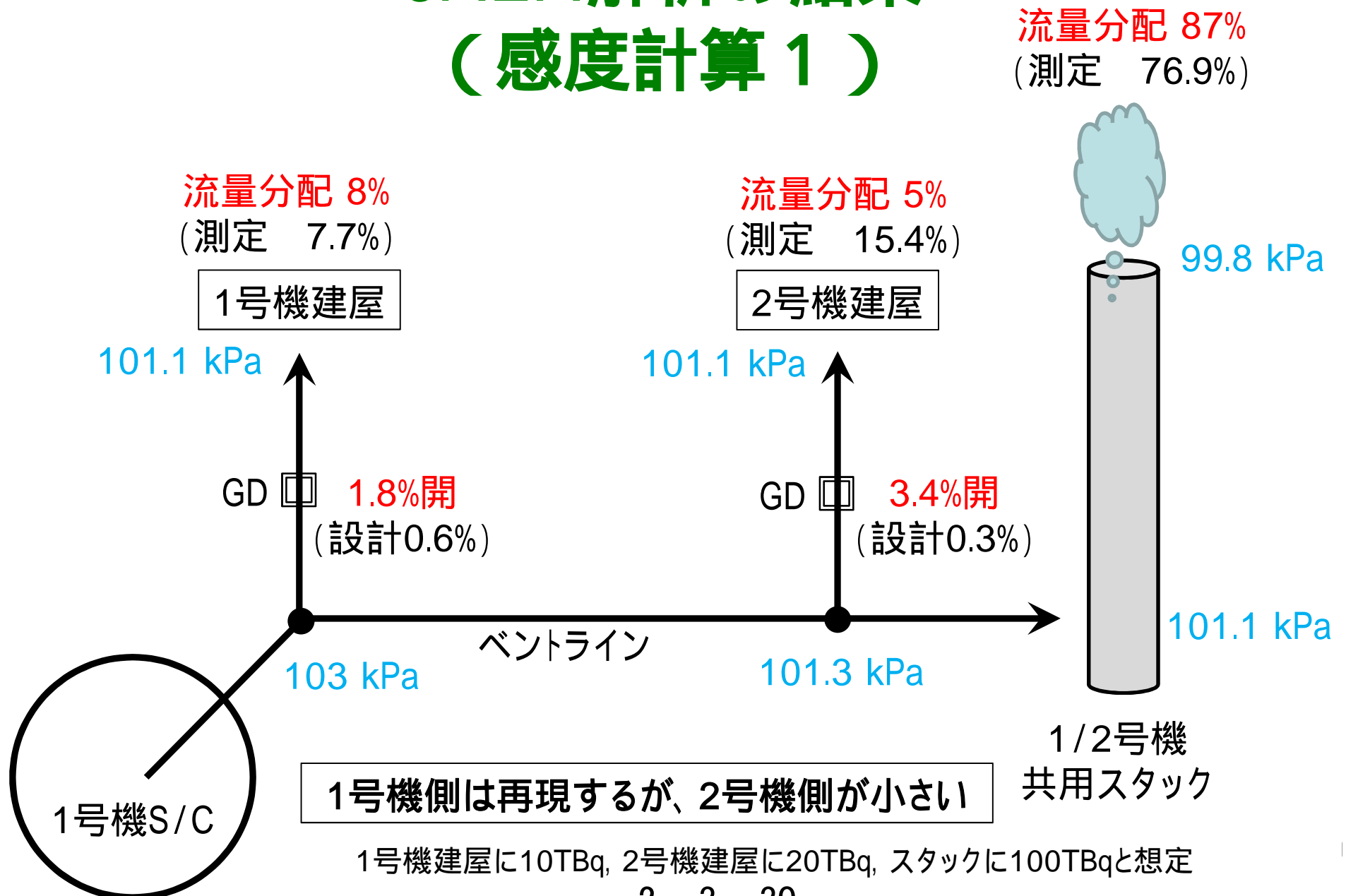


- JAEAの解析インプットを確認し、設定の詳細などを確認
- NRAでもJAEAデータを利用

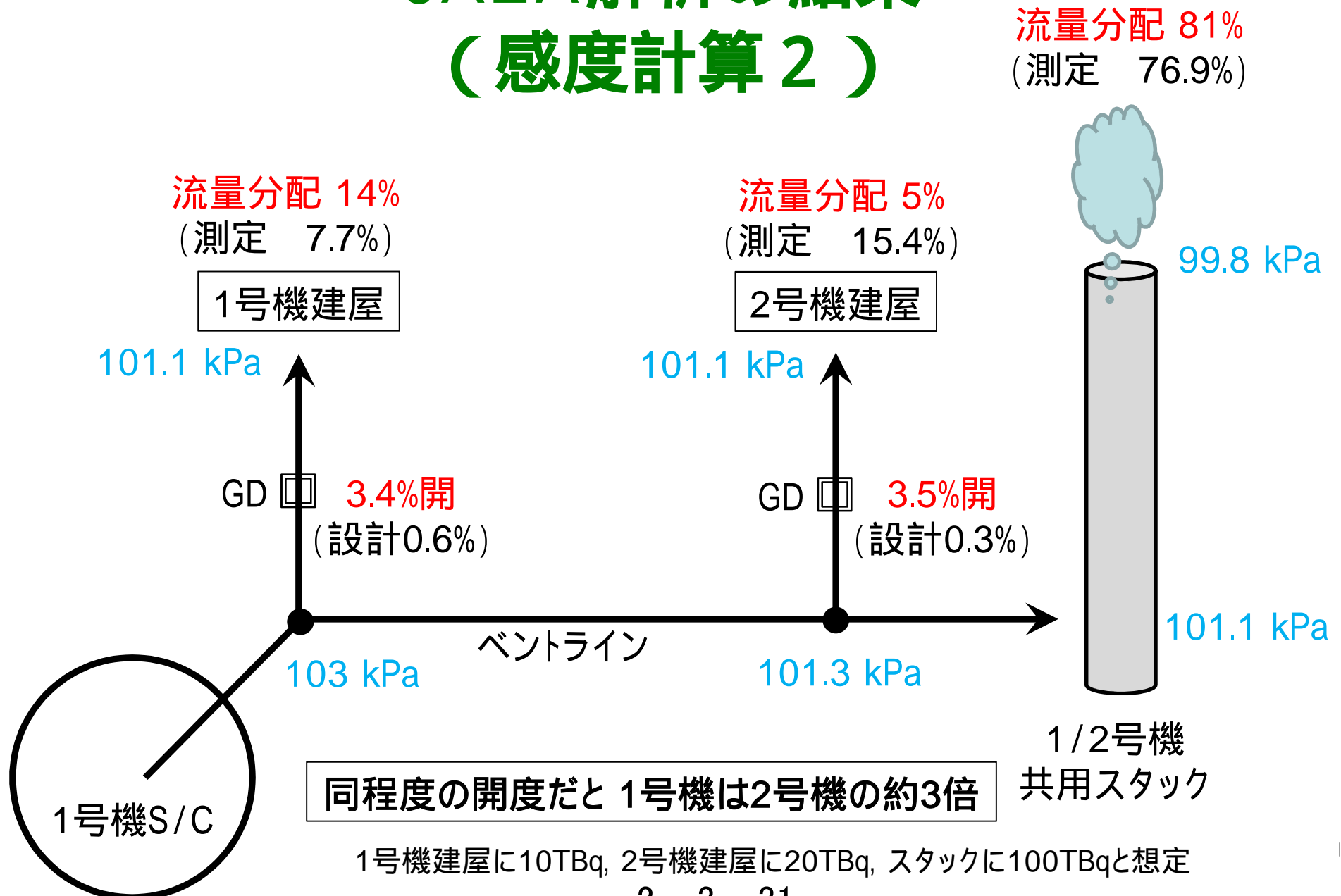
JAEA解析の結果 (基本ケース)



JAEA解析の結果 (感度計算 1)



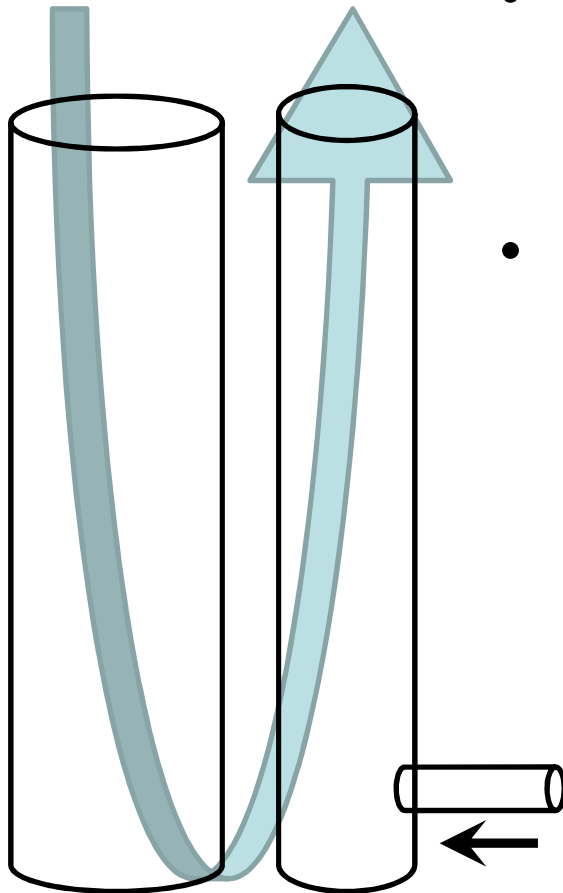
JAEA解析の結果 (感度計算2)



JAEA解析の結果（スタック内の流れ）

【RELAP解析の結果】

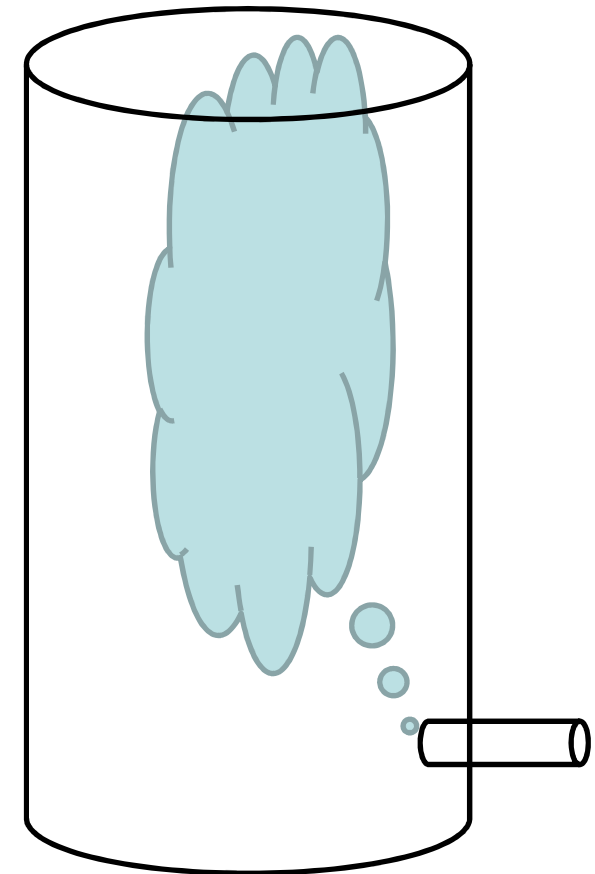
±20 ~ 30 kg/s



- ベント流の20倍以上の流量で片方は上昇流、他方は下降流
- スタック内は外の空気とほぼ同じ組成、温度になっており、ベントガスは直ちに外へ排出される（中間とりまとめ資料に記載のように排出に10分かからない）

~ 1 kg/s

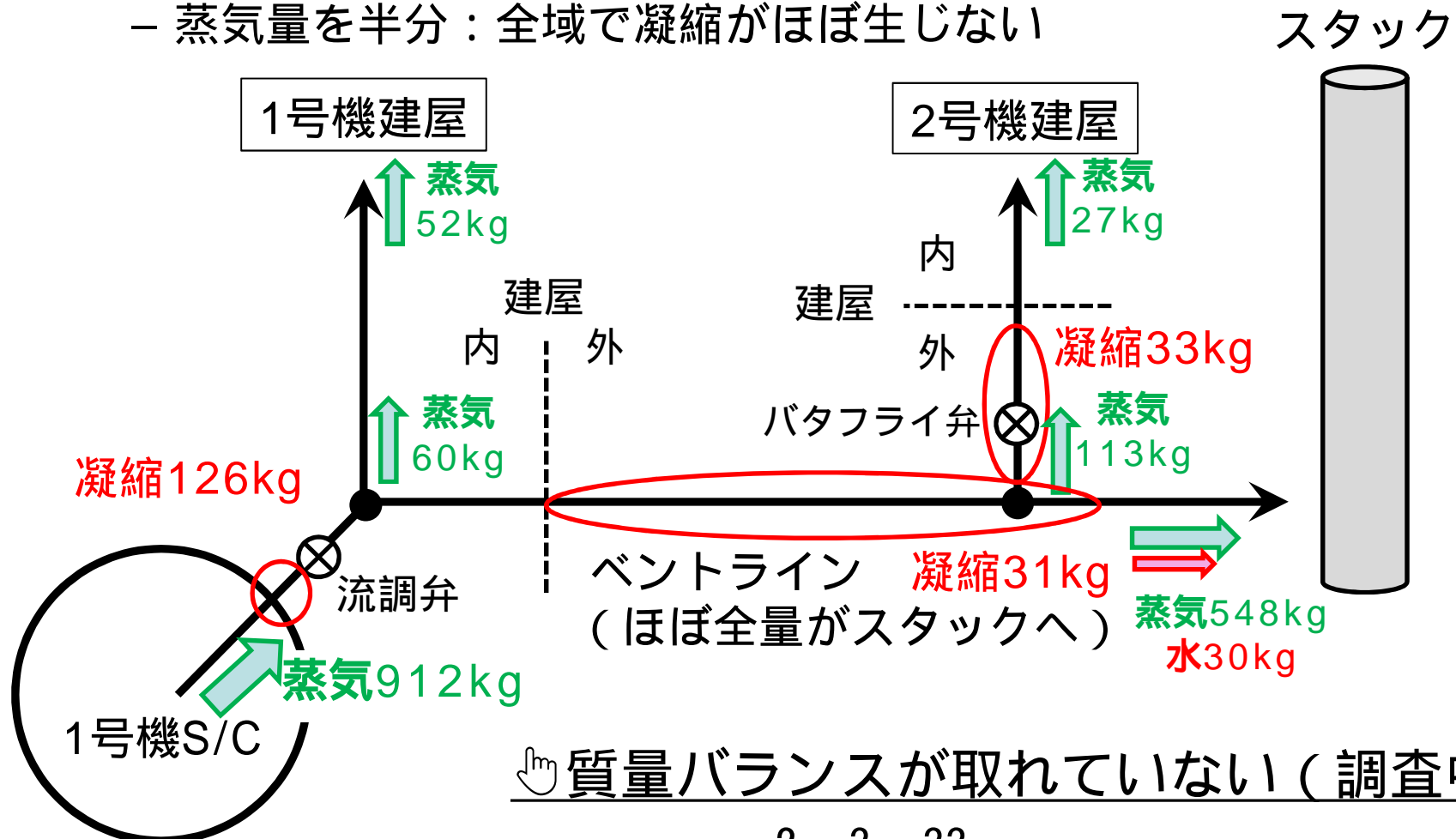
実際は？



凝縮の流入蒸気量に対する感度

• S/Cからの蒸気量を変化

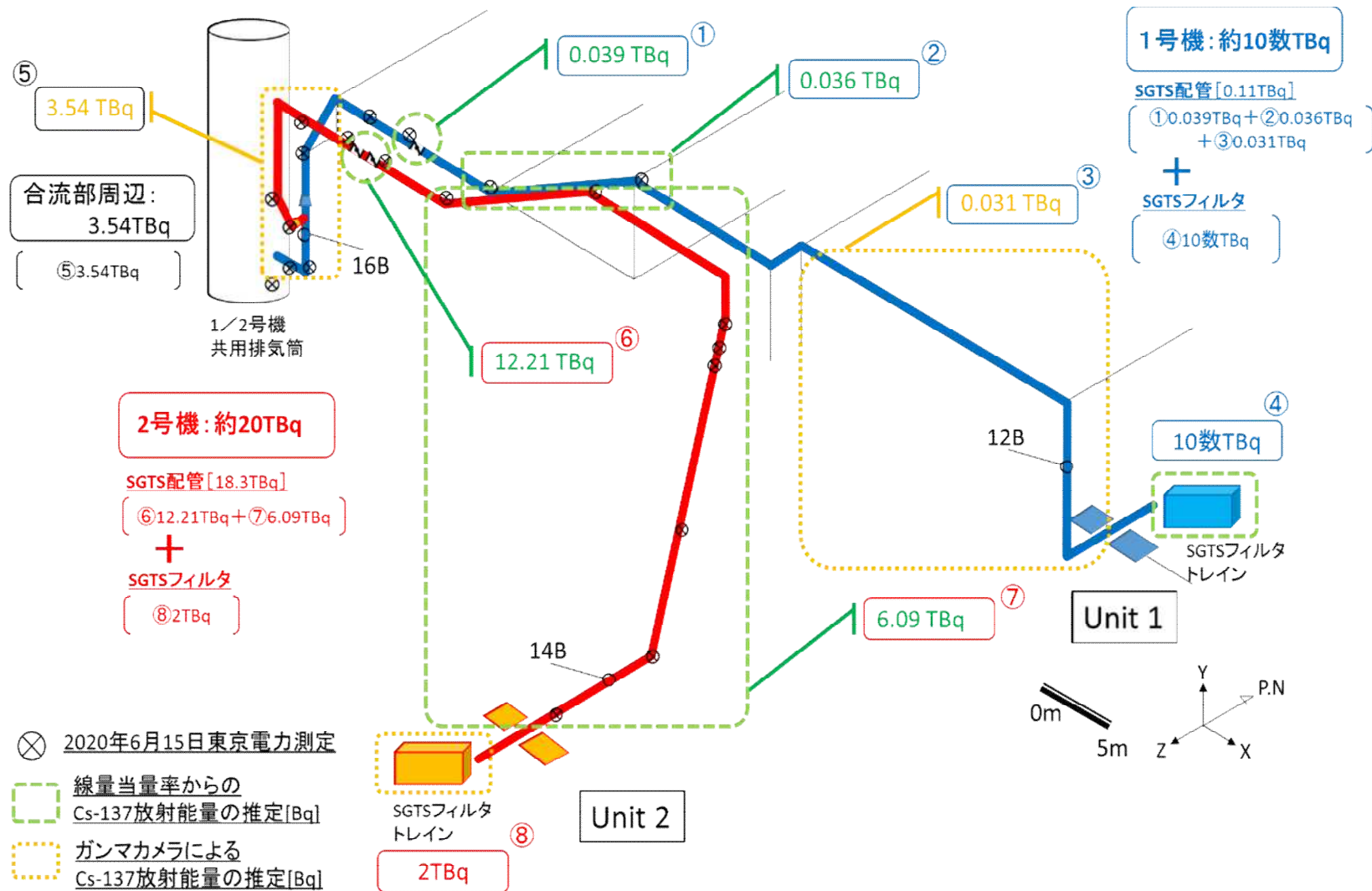
- 蒸気量を2倍（下図）：凝縮範囲広がる、凝縮量増加
 - 2号機SGTS配管での感度が特に大きい
- 蒸気量を半分：全域で凝縮がほぼ生じない



昨年度の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： $v_{\text{dep}} = 0.4 \text{ mm/s}$ （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： $v_{\text{dep}} = 0.1 \text{ mm/s}$ （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： $v_{\text{dep}} = 0.12 \text{ mm/s}$ （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がベント閉止後に2号機SGTSへ逆流と考察

中間取りまとめ 別添3図2



配管曲がりでの汚染

下降 水平 (配管曲がりによる流れの向きの変化)

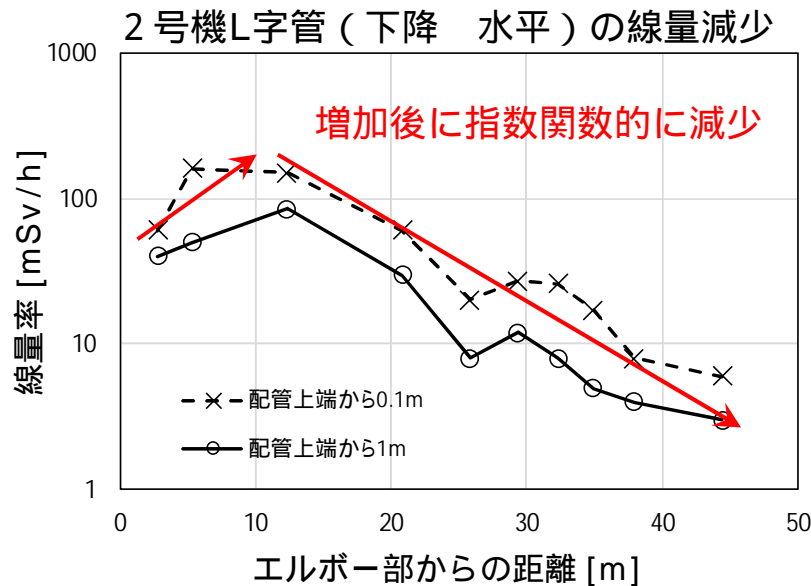
- 顕著な線量増加、上部より底部に汚染 (合流部のみ測定あり)
- 線量の位置依存 (2号機、左下図) : 増加後に指数関数的な減衰

斜め下降 水平、水平 斜め下降、水平 斜め上昇

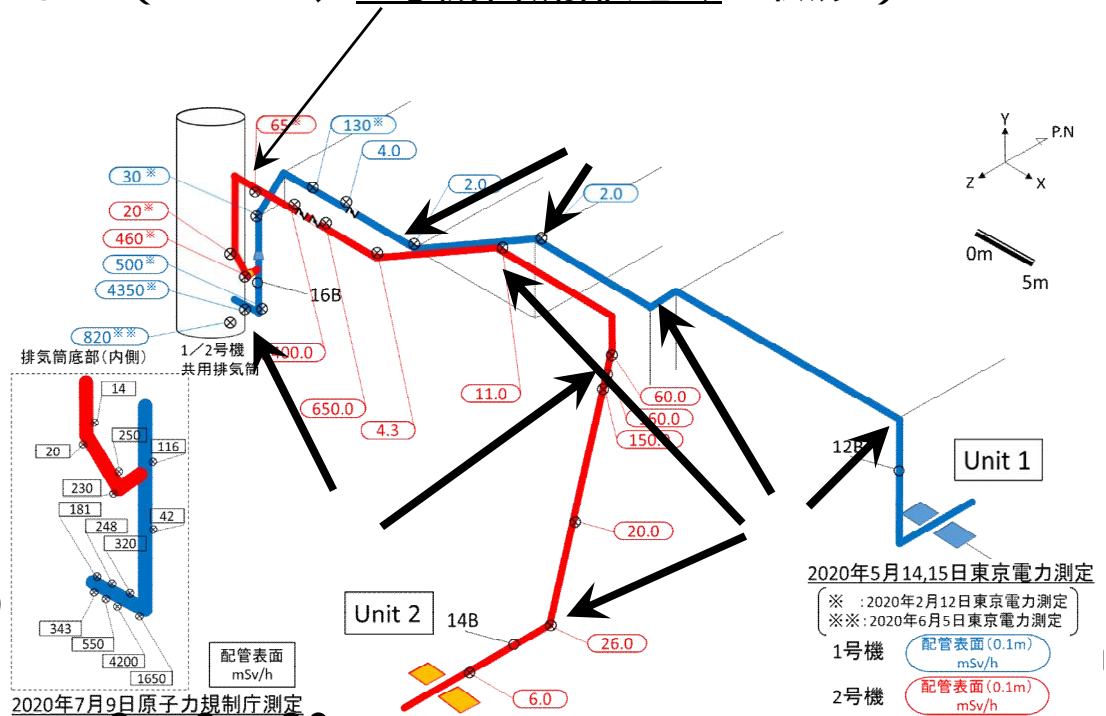
- 線量増加は見られない (むしろ減少?)

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)



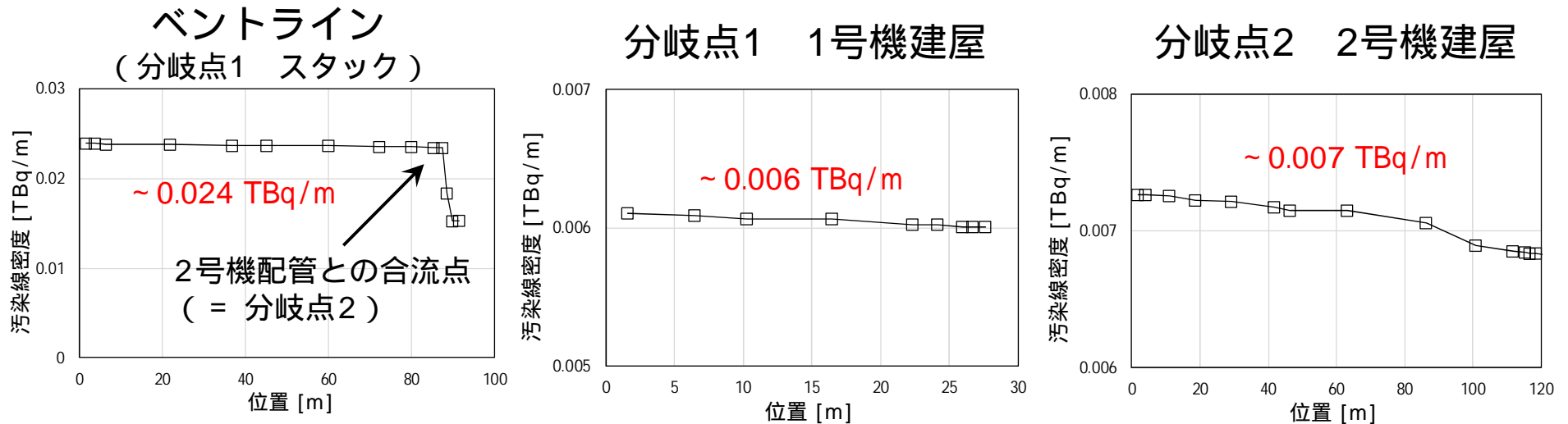
第84回特定原子力施設監視・評価検討会 資料4-3から作成



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当然ながら再現できない

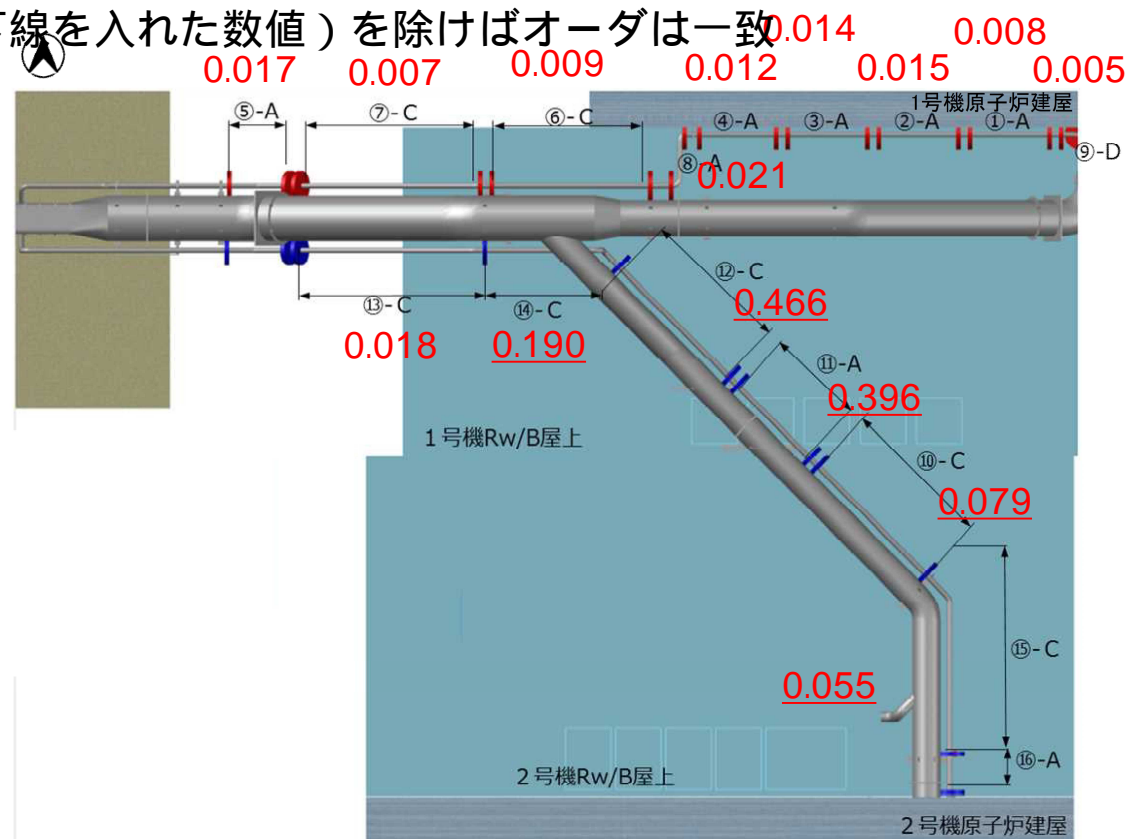
第22回事故分析検討会 資料5 - 2

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

切断予定範囲	汚染密度(Bq/cm ²)	汚染量(Bq)
①-A	8.16E+05	4.14E+10
②-A	1.64E+06	8.56E+10
③-A	1.46E+06	7.42E+10
④-A	1.24E+06	5.67E+10
⑤-A	1.84E+06	7.11E+10
⑥-C	9.61E+05	9.70E+10
⑦-C	7.84E+05	1.03E+11
⑧-A	2.26E+06	1.04E+11
⑨-D	5.55E+05	3.32E+10
⑩-C	7.58E+06	9.04E+11
⑪-A	3.82E+07	2.42E+12
⑫-C	4.49E+07	5.90E+12
⑬-C	1.70E+06	2.23E+11
⑭-C	1.83E+07	1.84E+12
⑮-C~⑯-A	5.31E+06	8.43E+11



GDの汚染状況は？

- **GDでは気体がせまい隙間を通過したと考えられる**
 - L字管（下降 水平）同様に高汚染となっていないか？
 - L字管と同じく、GDでは下降流が壁に遮られ大きく流れが乱れる
 - GDでは、気体とエアロゾルはせまい隙間を通らないと通過できない。通過できなかった粒子が壁上に堆積すれば高線量の原因となる
 - 高線量でない場合、考えられる原因
 - 流れの乱れが大きい： 粒子が壁上に大人しく堆積しない
 - 建屋内は低温ではなく凝縮水がない： 粒子を壁上に留められない
 - 隙間を通る流れが速い： 通過流に巻き込まれた粒子が一気に通過
- **GDの線量測定は？**
 - L字管との共通点・差異の分析が高汚染の原因追及の材料となりうる

