

水封式圧縮空気貯蔵(CAES)技術と 電力貯蔵への応用の展望

2011/12/10

電力中央研究所 末永弘

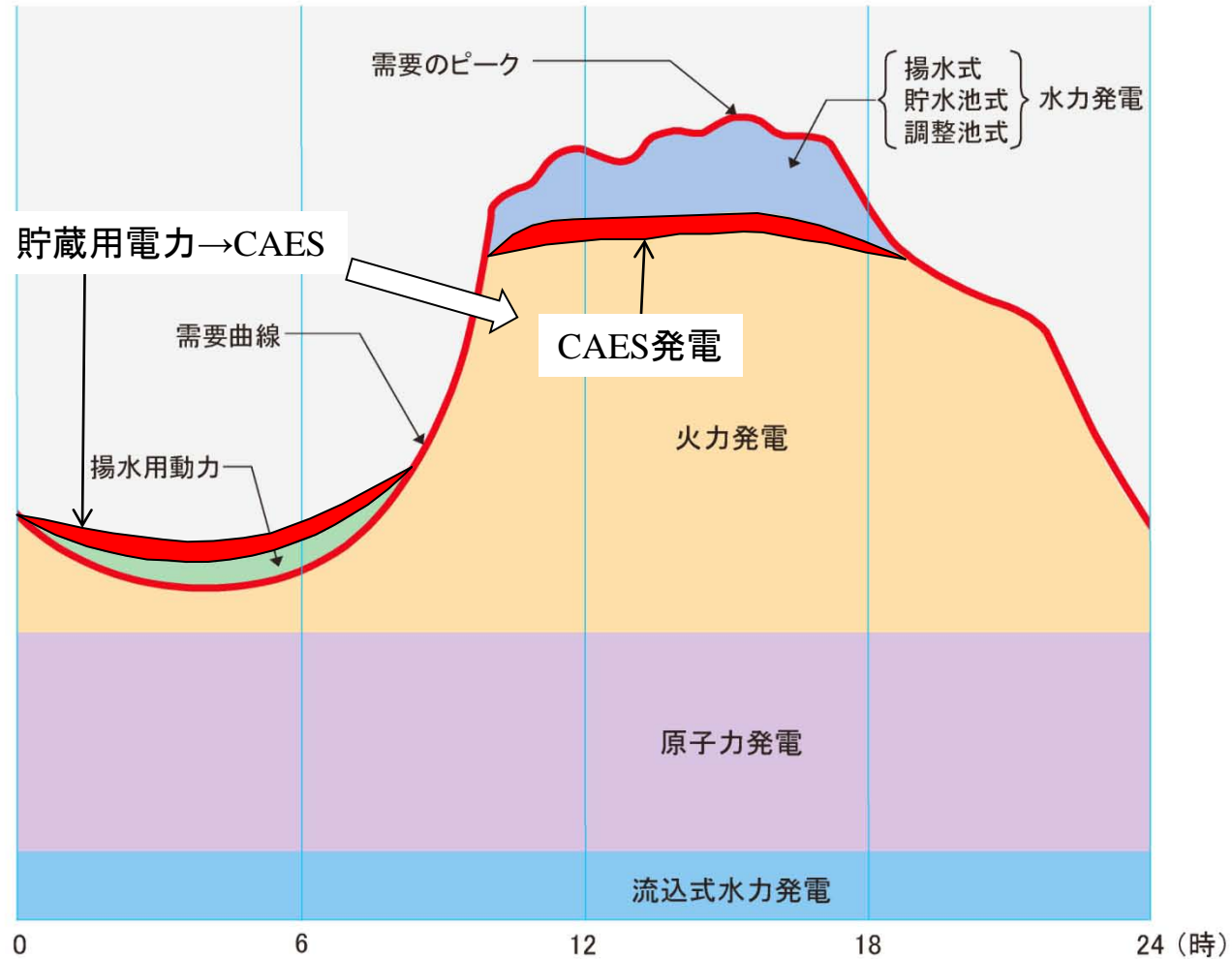
本日の内容

- イントロ：CAES（圧縮空気貯蔵）発電とは？
- 水封式CAES技術のご紹介：電中研で2002年までに実施してきた研究成果の概要
- 電力貯蔵技術への応用（展望）

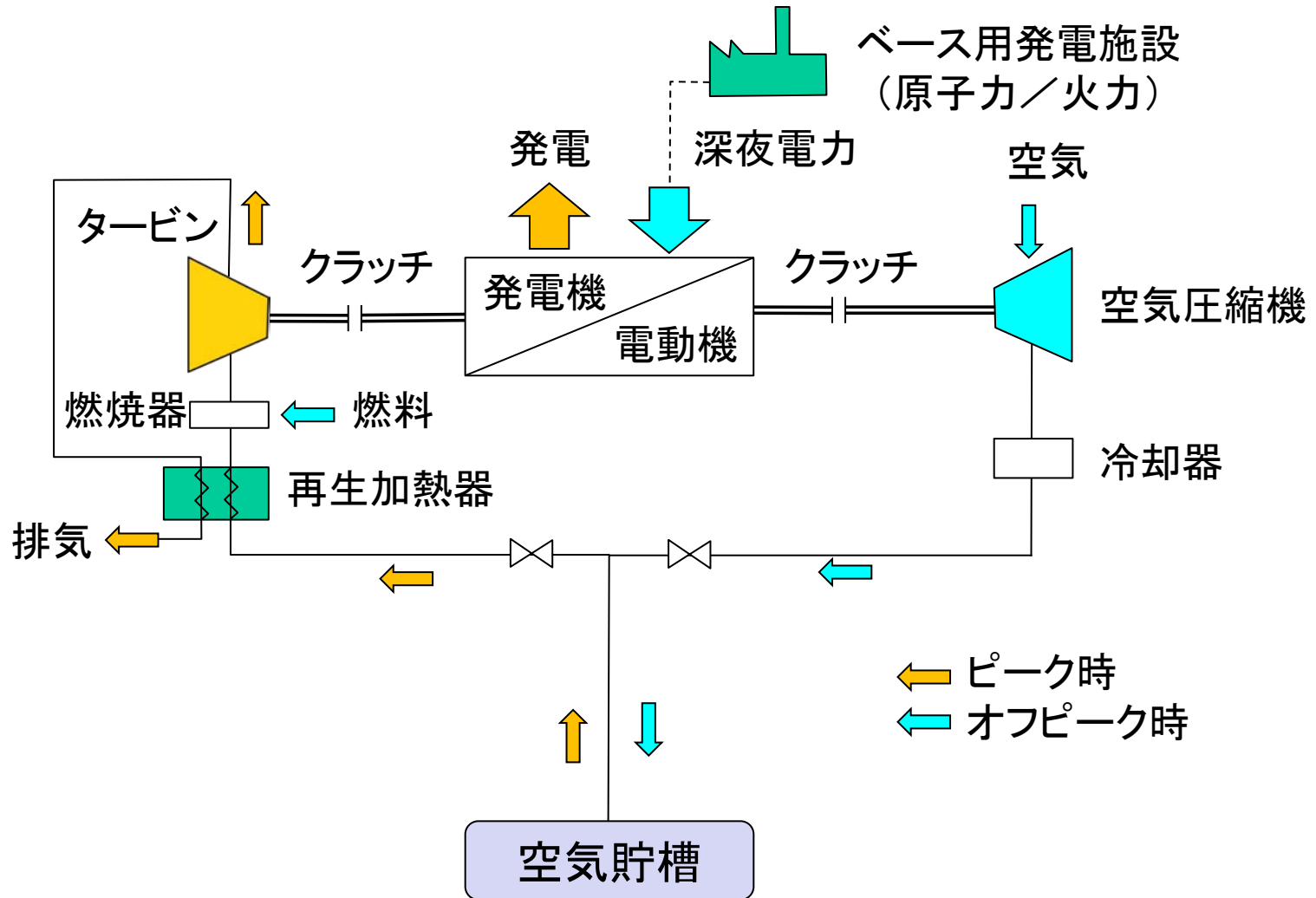
イントロ: CAES (圧縮空気貯蔵) 発電とは？

CAES:ピークシェービングとしての役割

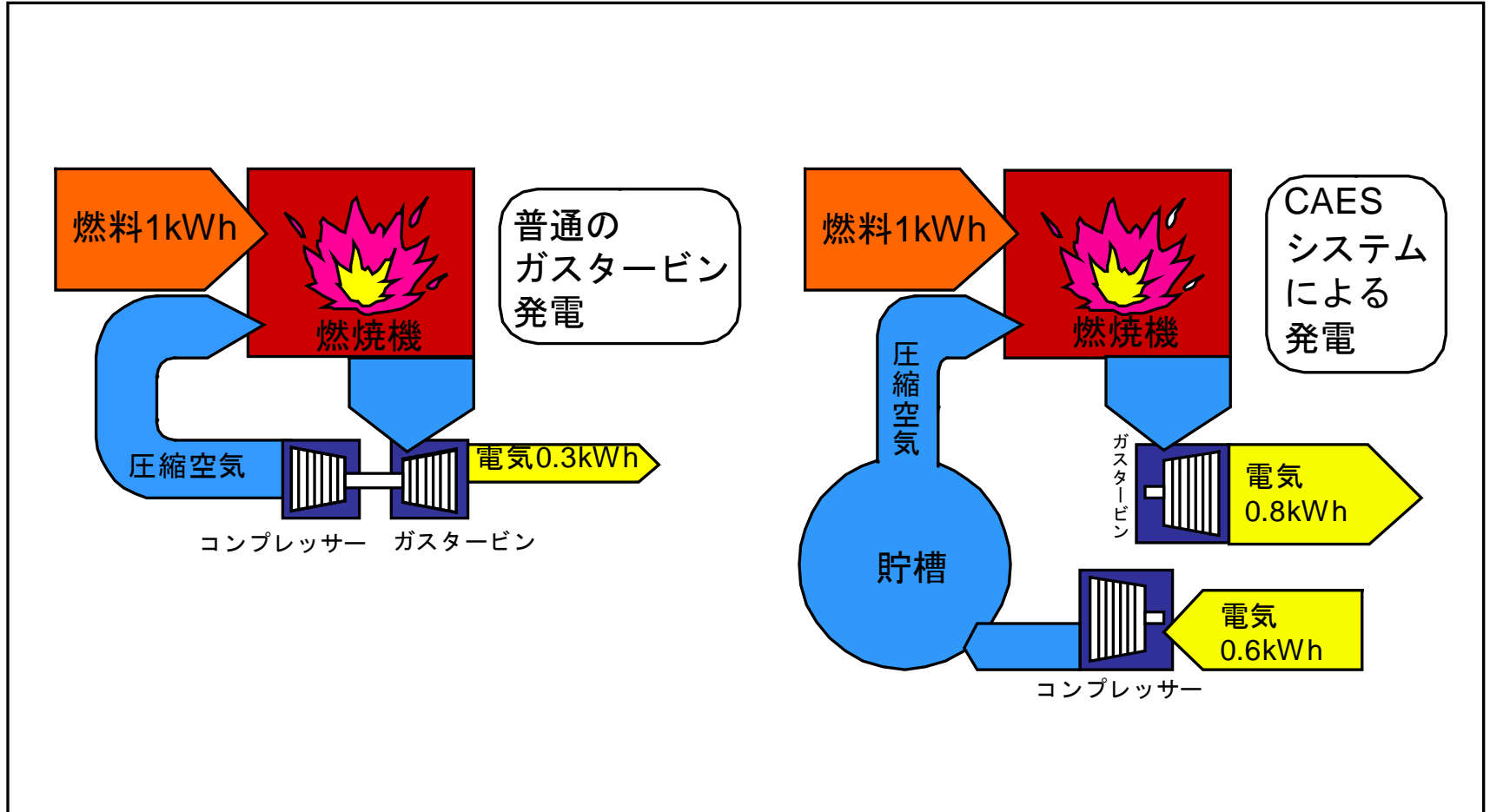
CAES: Compressed Air Energy Storage



CAESシステムの概略図

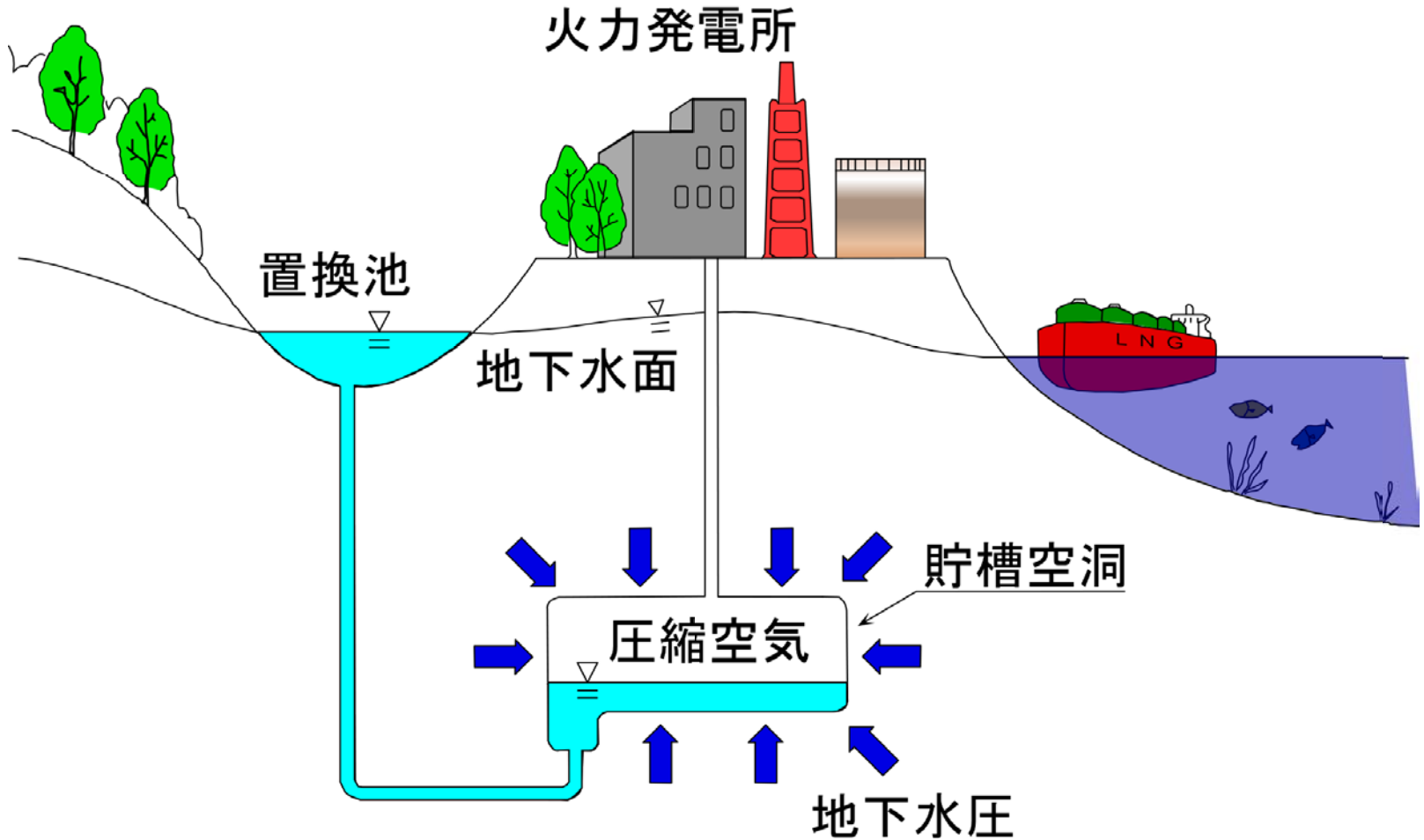


ガスタービン発電とCAES方式発電の比較



同量の燃料に対する発電量が大きくなる

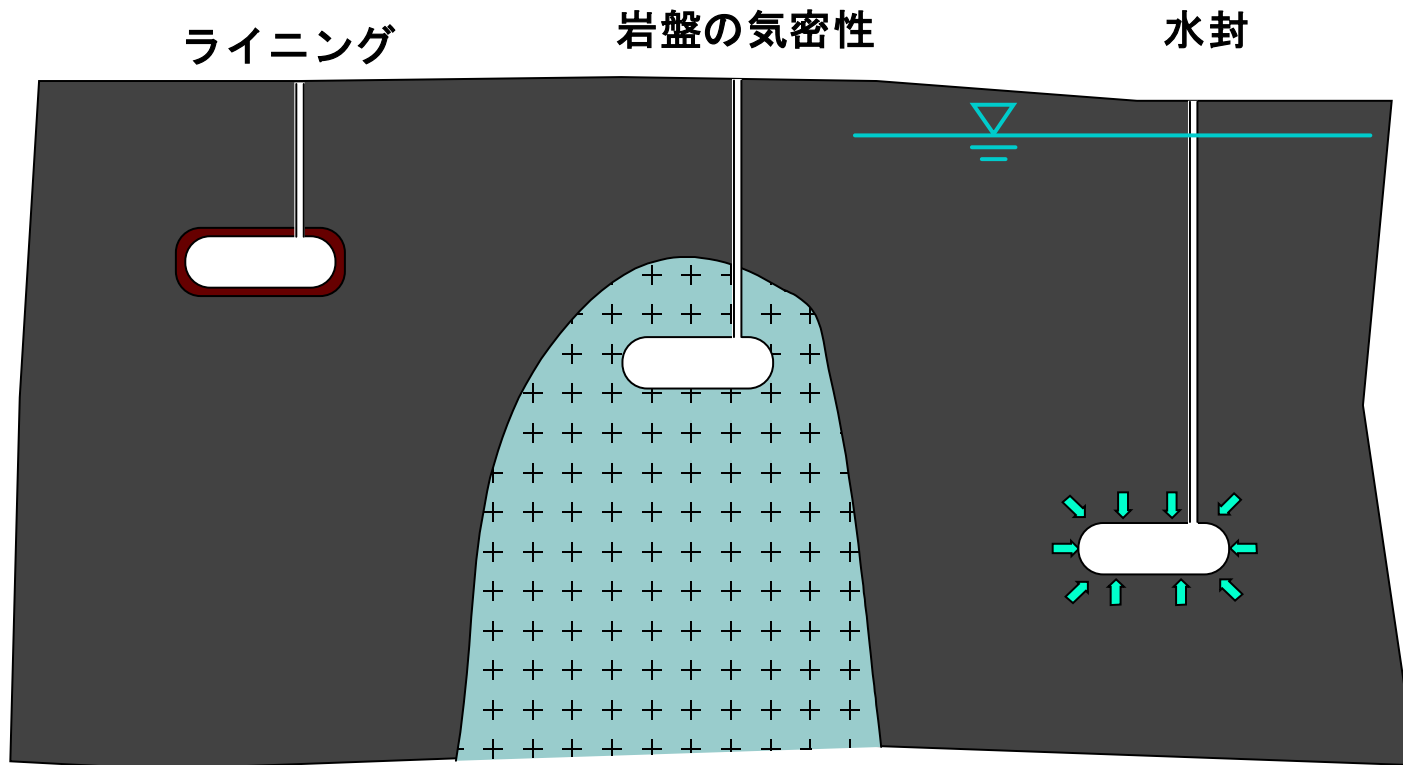
CAES (圧縮空気貯蔵) 発電の概念



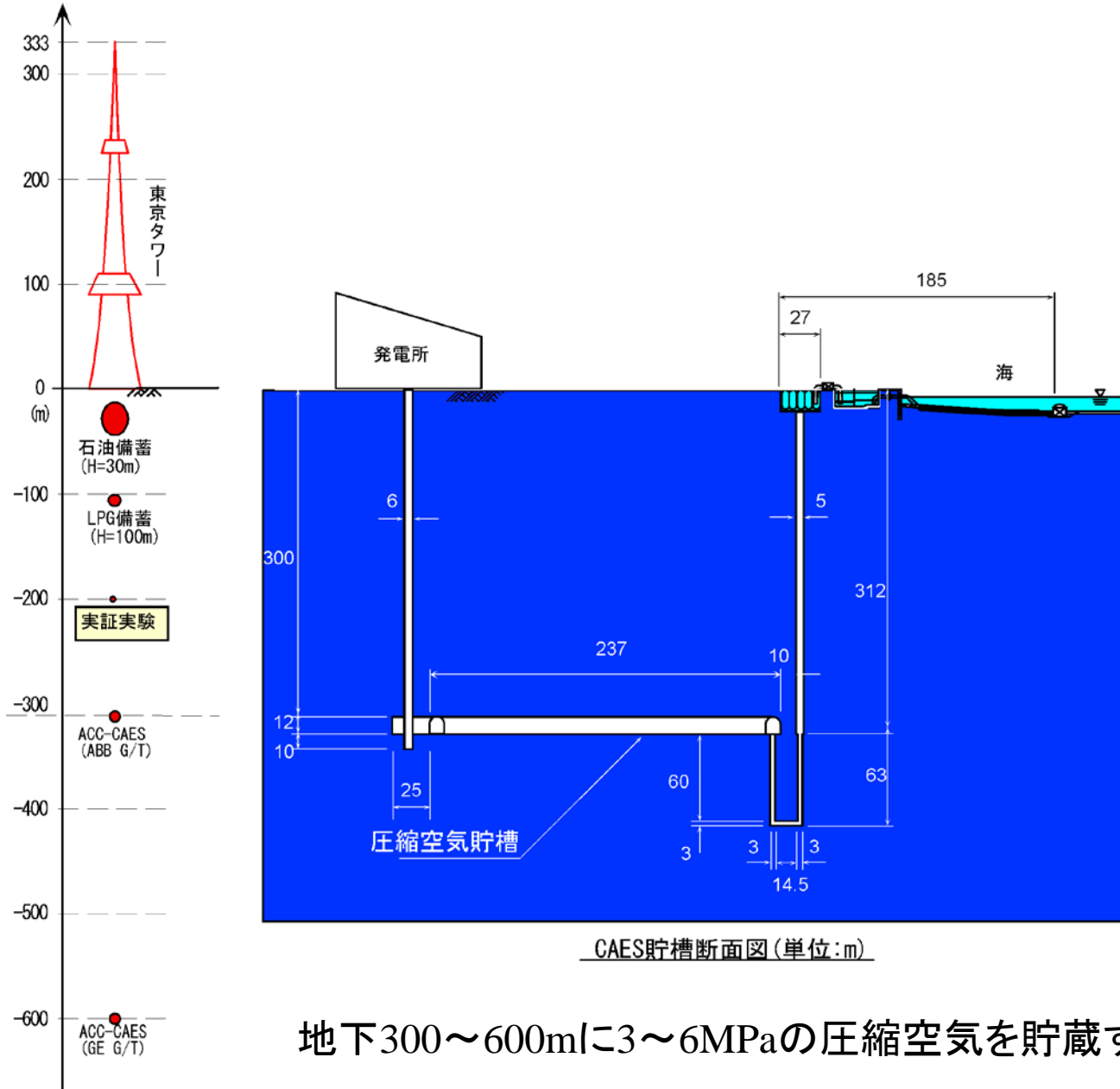
圧縮空気貯蔵発電: ガスタービン発電に必要な高圧空気を夜間・オフピーク時の安価な電気で作製し、岩盤に掘削された地下空洞に一時的に貯蔵し、昼間に発電に利用するもの

岩盤におけるCAESの貯蔵方式

気密方法	長所	課題
ライニング	深度に制限なし	ライニングコスト
岩盤の気密性	深度に制限なし 覆工コスト不要	サイティング
水封	覆工コスト不要	水封機能の実証 サイティング



水封式CAES地下貯槽の設置イメージ



水封式CAES技術：現場実験の成果

電中研における水封式CAES研究プロジェクト

研究項目	年度	-87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	2000	01	02	
(第1フェーズ:フィージビリティ調査)	・技術課題の抽出		貯蔵方式の比較															
	・電力貯蔵技術の経済性評価		発電コストの評価															
(第2フェーズ:基本特性の解明)	・水封機能の解明		粹風実験 (花崗岩、金剛地点)															
	・深部軟岩の力学特性の解明		軟岩物性(袖ヶ浦地点)															
	・軟岩貯槽方式の検討		鋼管シャフト方式の提案															
	・CAESシステムの効率と経済性向上							ACC-CAESの技術開発										
	・地下貯槽調査・評価技術							貯槽建設指針素案の検討										
	・岩盤気密特性の検討						素掘空洞貯蔵実験(神岡地点)											
	・堆積岩における水封機能の解明								水封実験 (堆積岩、小倉地点)									
	・シャンペン現象の解明								シャンペン模型実験と解析									
	(第3フェーズ:水封式地下貯蔵技術の実証)	・既設CAES発電所の実態調査																
		・CAES発電導入効果の検討																
・実証のための水封式貯蔵実験																		
・合理的な人工水封方式の開発																		
・長期地下水挙動の把握																		
・岩盤漏気挙動の評価																		
(その他)																		
	新型負荷平準化電源の環境影響評価							環境影響評価手法										



○プロジェクト期間:1987
~2002年

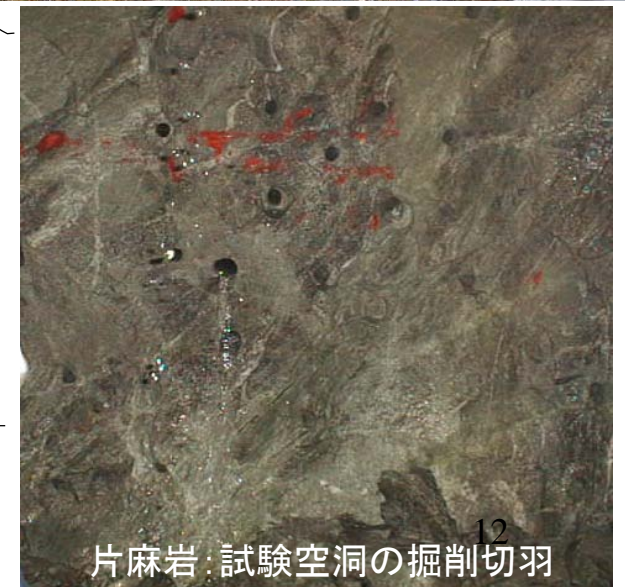
(水封式圧縮空気貯蔵実証実験は第3フェーズ、1998~2002年)

○目的

- 1) トンネル形式での圧縮空気貯蔵の実証
(岩盤特性の不均一の影響評価)
- 2) 漏気挙動の把握
(限界圧以上の空気の漏洩評価)
- 3) 貯槽空洞周辺での地下水挙動の把握
(岩盤地下水挙動評価)

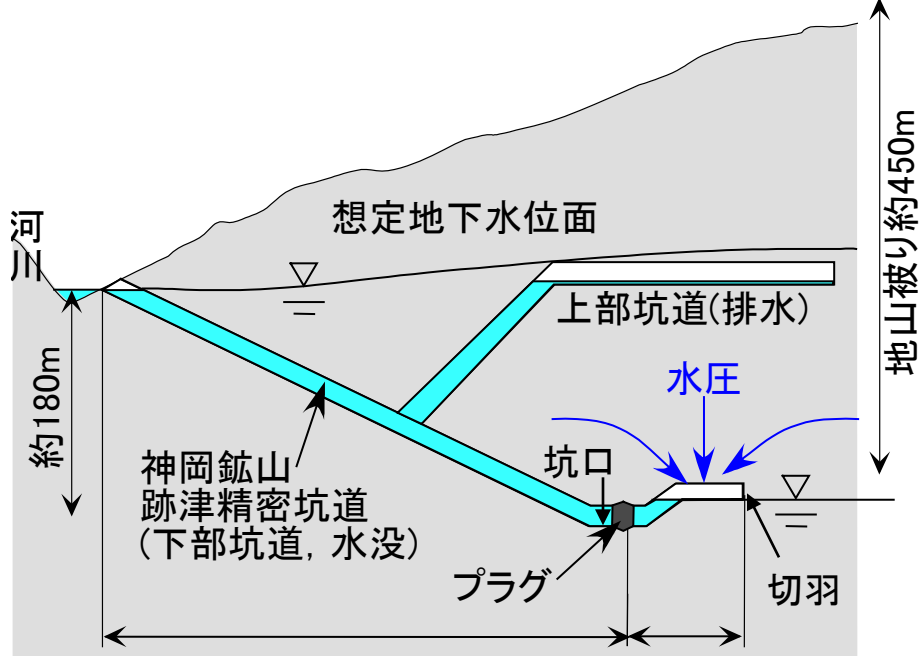
実験現場の概要 —現場の所在地—

- 岐阜県飛騨市にある神岡鉱山
- 現場の地質：飛騨変成岩類の片麻岩類，一部安山岩が貫入
- 付近に跡津川断層が存在(実験現場への直接の影響はない)

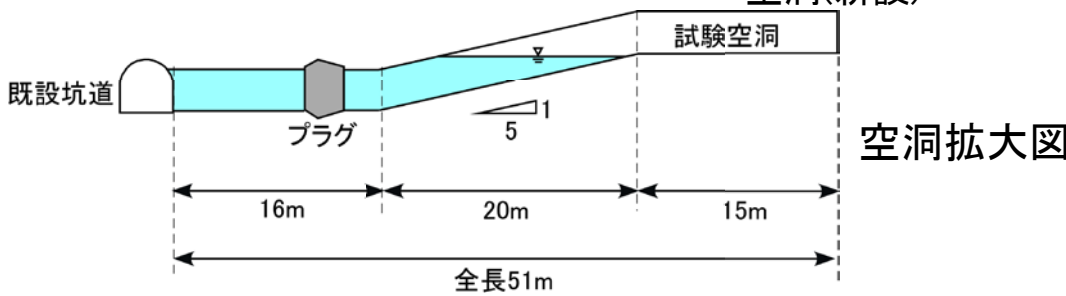


実験現場の概要 — 実験サイト概要 —

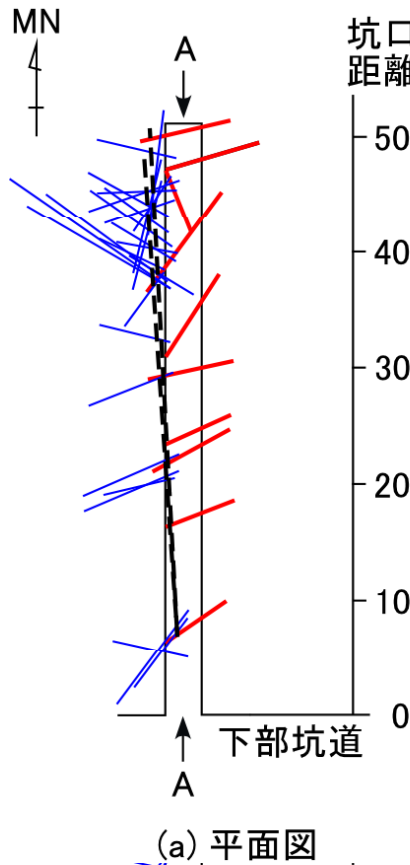
- 地下水面下約180mに掘削された空洞(地山被り約450m)に約1.9MPaの圧縮空気を貯蔵
 ⇒水封(地下水圧で空気の漏洩を防ぐ方法)の実証を目的とした実験
- 実験用空洞の形状: 坑口より16m平坦部+20m斜坑部+15m平坦部⇒空洞からの空気の漏洩を防止する構造



既設坑道 実験用空洞(新設)

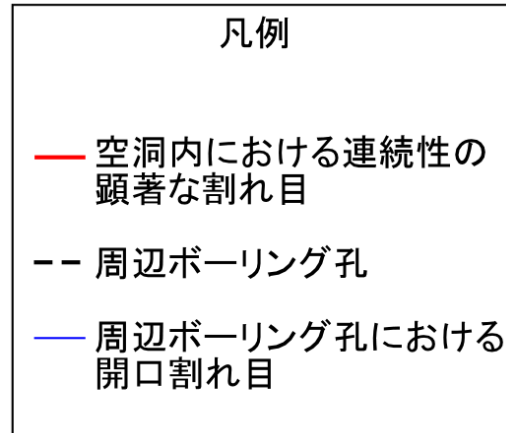


試験空洞周辺の割れ目分布



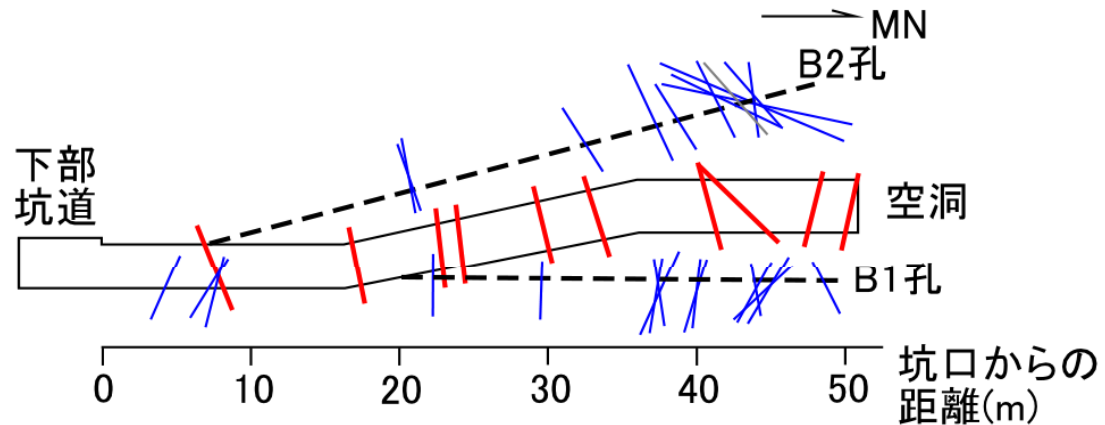
坑口からの
距離(m)

50
40
30
20
10
0

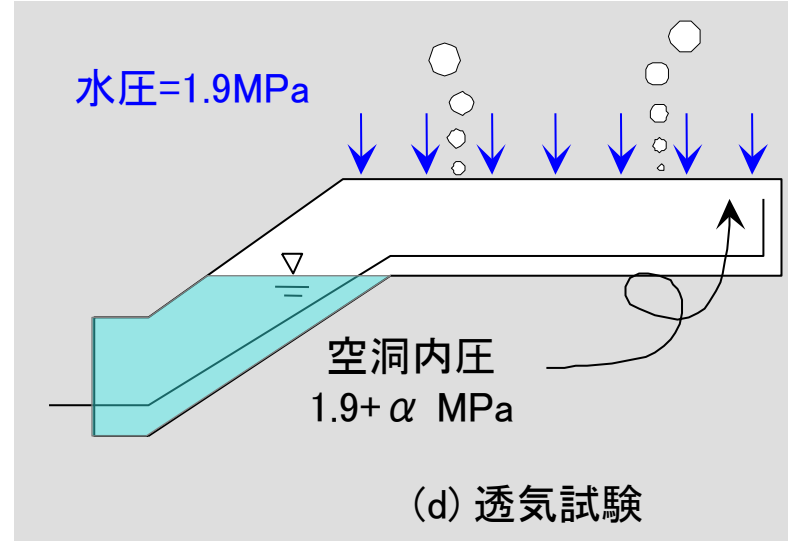
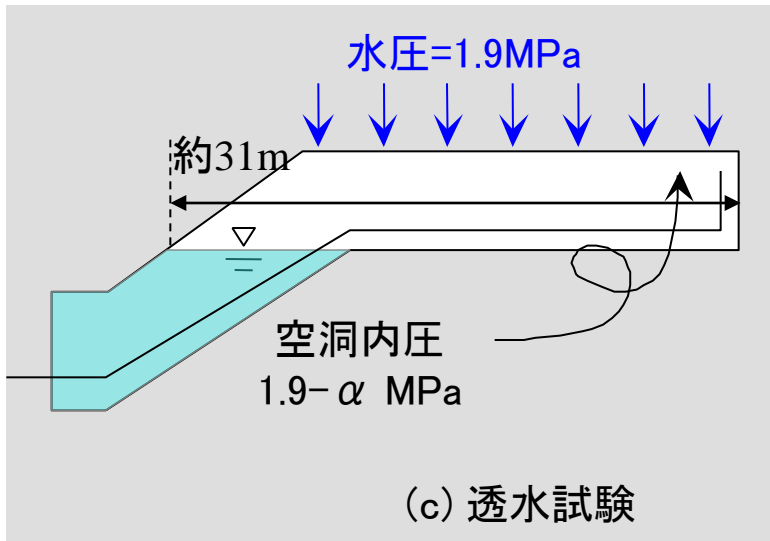
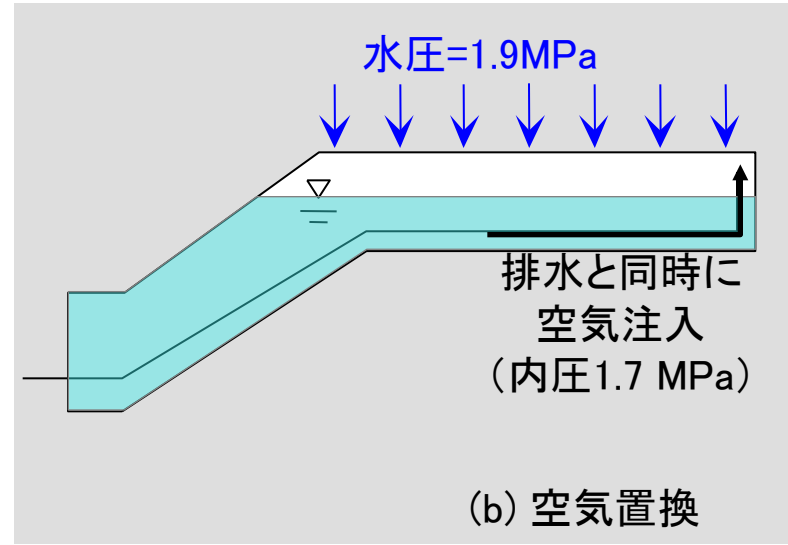
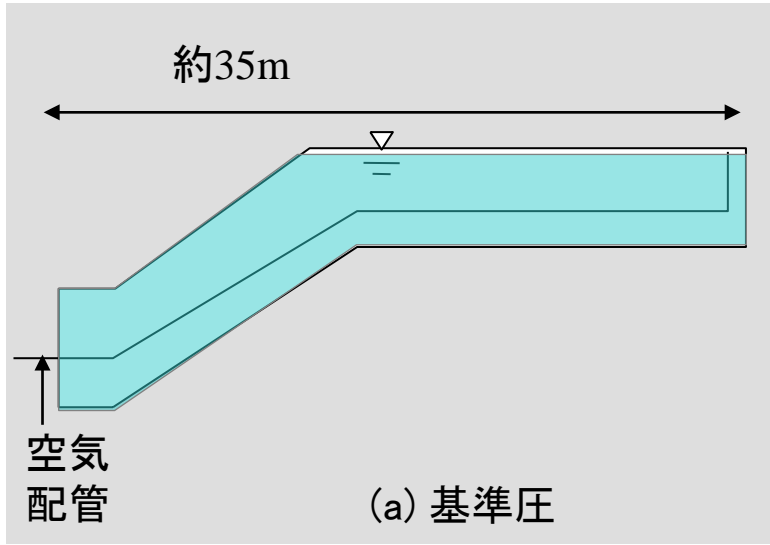


- ✓試験空洞には**10本の連続性のある割れ目**が存在
- ✓近傍のボーリング孔における開口割れ目のうち**数本は実験空洞へ連続する**と推定

⇒ **ここが主な透水・透気箇所になると**考えられた



実験の概要



空洞長さ: プラグまでの全長=約35m, 空気室の全長=約31m

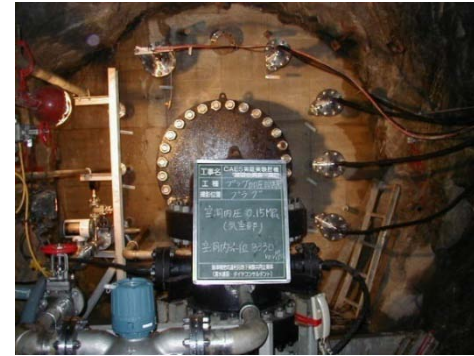
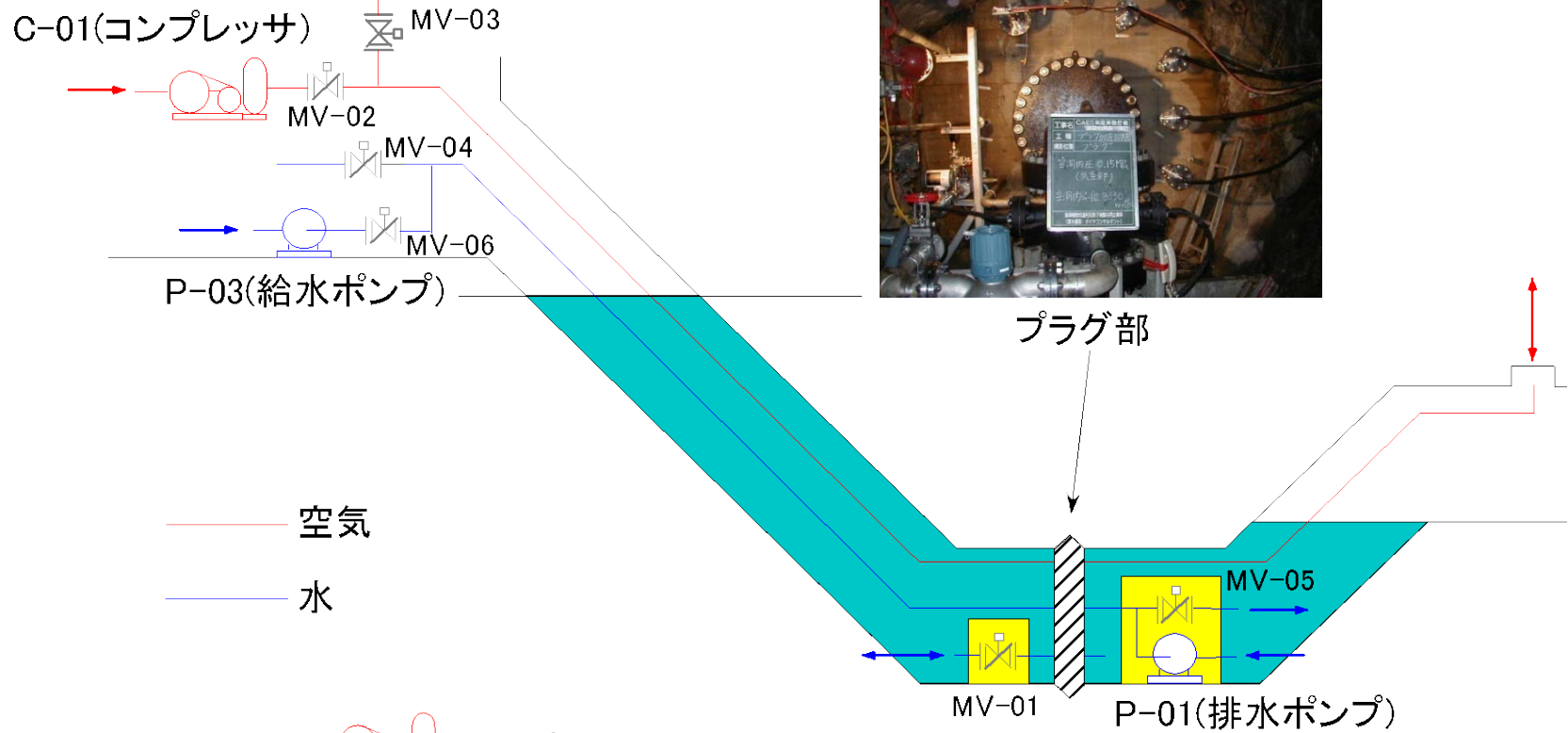
基準圧: 地下水圧と平衡となる空気圧を測定

透水試験: 空洞内圧を周辺地下水圧より小さくして湧水量を測定

透気試験: 空洞内圧を地下水圧以上として漏水・漏気量を測定

計測項目1

一気体注入量, 給水・排水量(地上~空洞への配管)一



コンプレッサ

C-01

排水ポンプ
 給水ポンプ

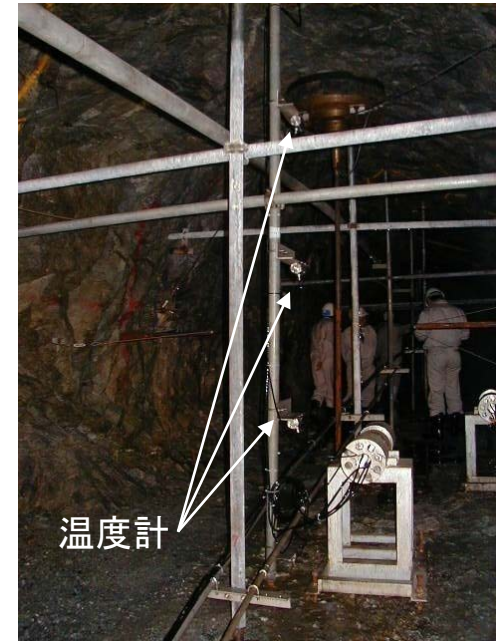
P-01
P-03

電動弁

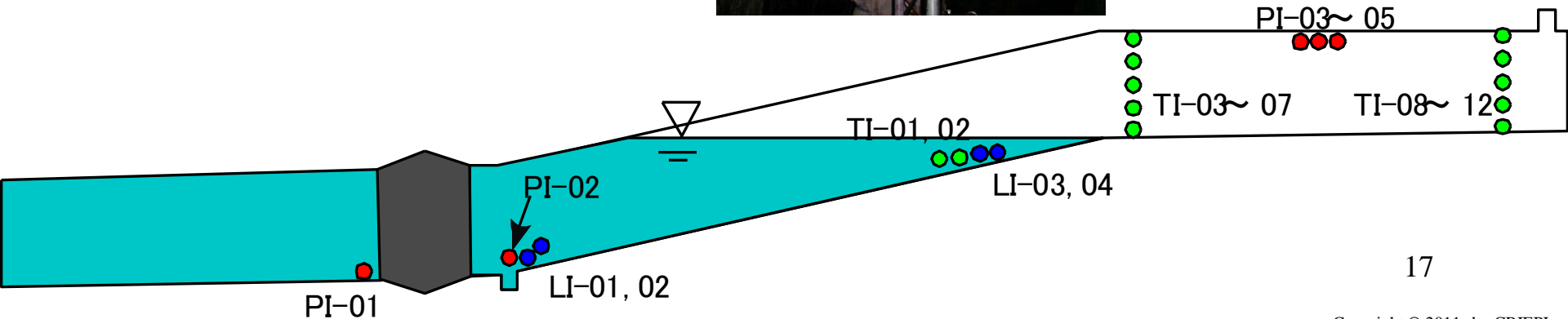
MV-01 (プラグ連通時「開」)
MV-02 (給気運転時「開」)
MV-03 (排気運転時「開」)
MV-04 (排水運転時「開」)
MV-05 (排水運転時「開」)
MV-06 (給水運転時「開」)

計測項目2 ー空洞内(圧力, 水位, 温度)ー

- **圧力** 気圧はPI-03~05の計測値の平均, 水圧はPI-02の計測値
- **水位** 空洞全体の水位変化はLI-01, 02の計測値の平均, 制御水位(EL183.288m)周辺の高精度な水位変化はLI-03, 04の計測値の平均
- **温度** 水温はTI-01, 02の計測値の平均, 気温はTI-03~06, 08~12の計測値の平均



- 圧力計
- 水位計
- 温度計

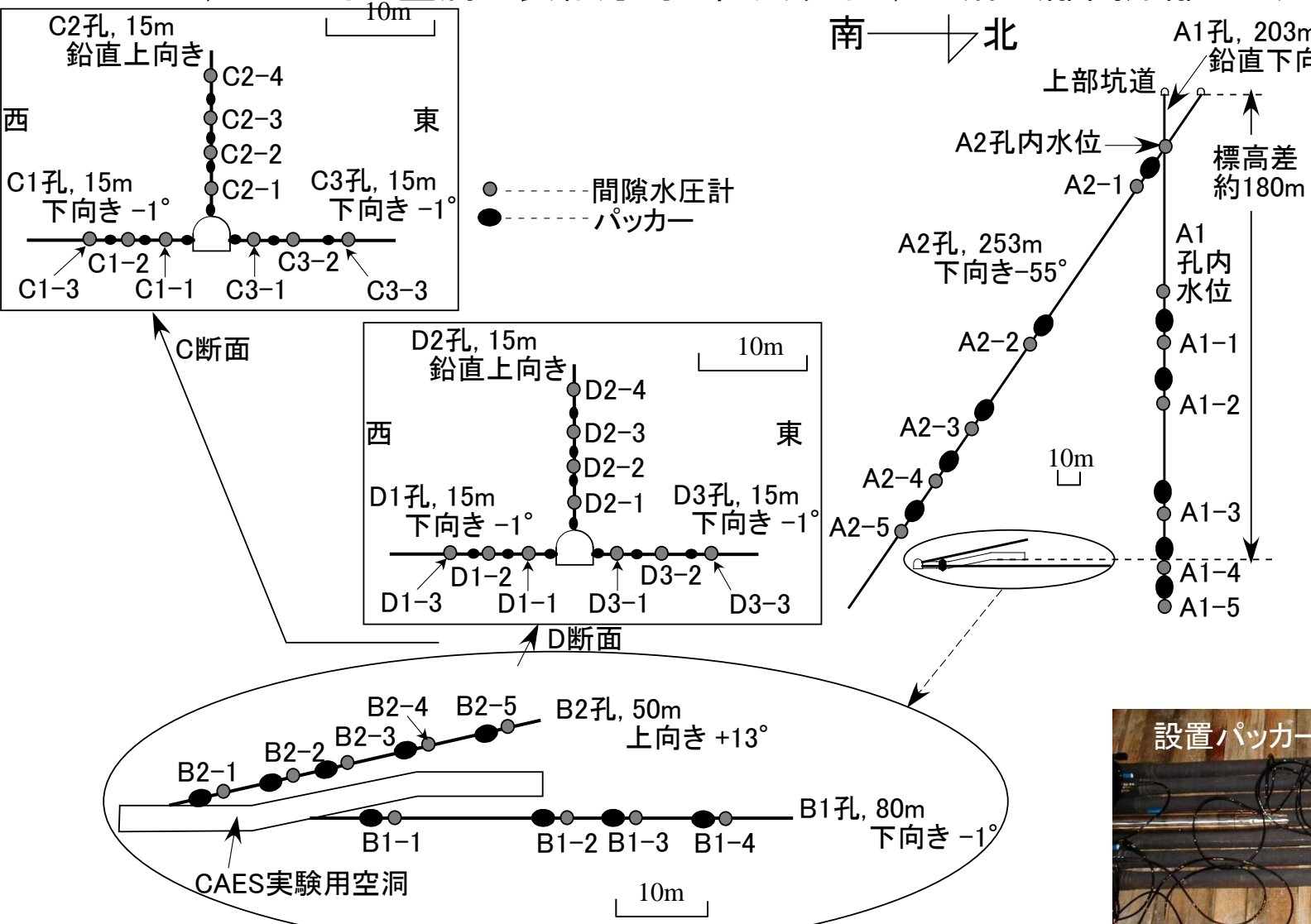


計測項目3 - 空洞外(間隙水圧計) -

A1, A2孔: 地下水位のある坑道から空洞を挟むように掘削

B1, B2孔: 空洞の近傍を上下に挟むように掘削

C1~3, D1~3孔: 空洞の長軸方向に直交するC, D断面(離間距離15m)に掘削



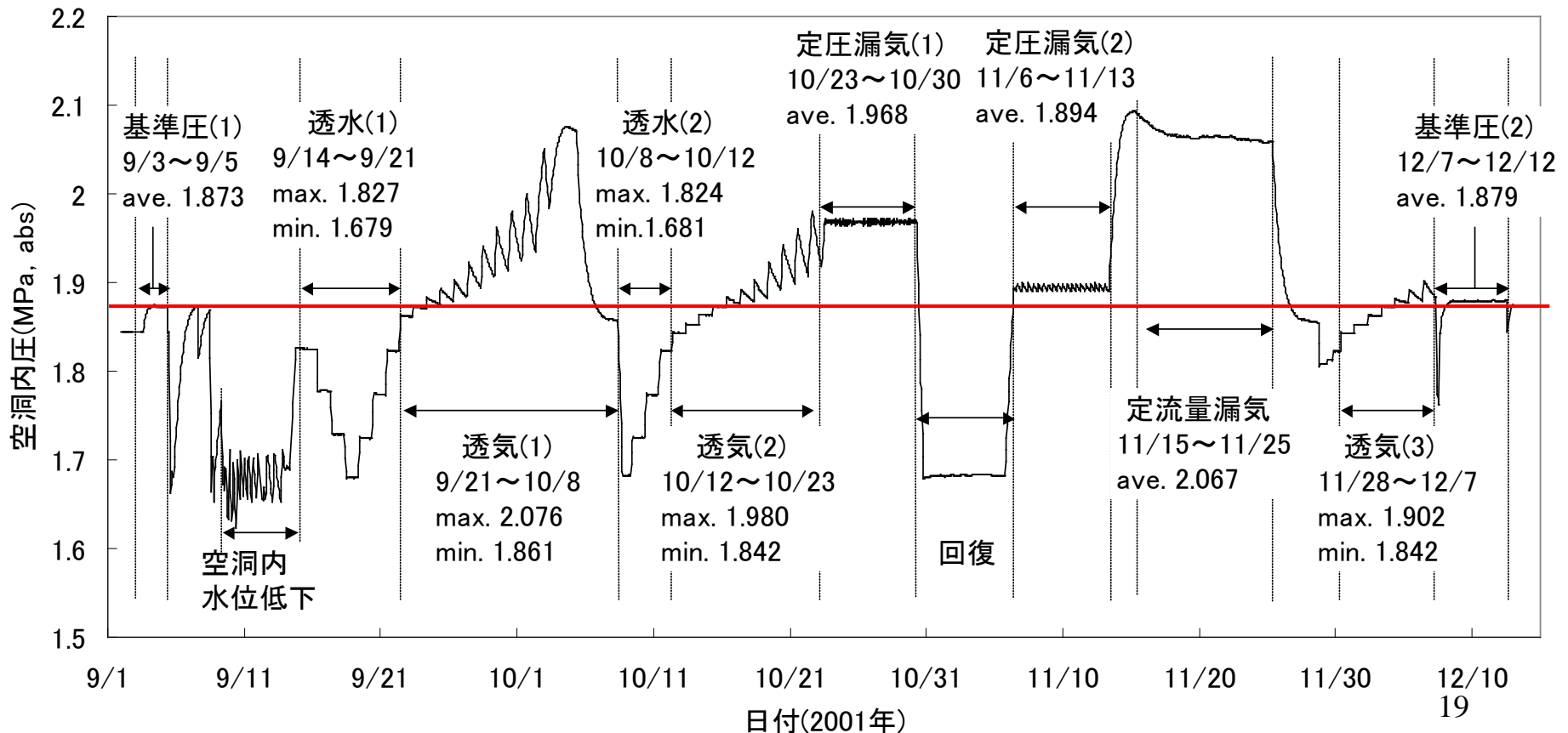
計測データ1 - 空洞内圧力変化 -

基準圧(1), (2): 空洞内圧と地下水圧が平衡する時の空洞内圧を計測 (基準圧 = **1.873MPa**であった)

透水(1), (2): 基準圧より小さい空洞内圧で湧水量を測定, 空洞が水飽和時(透水(1)), 一度透気試験を履歴した不飽和時(透水(2))に実施

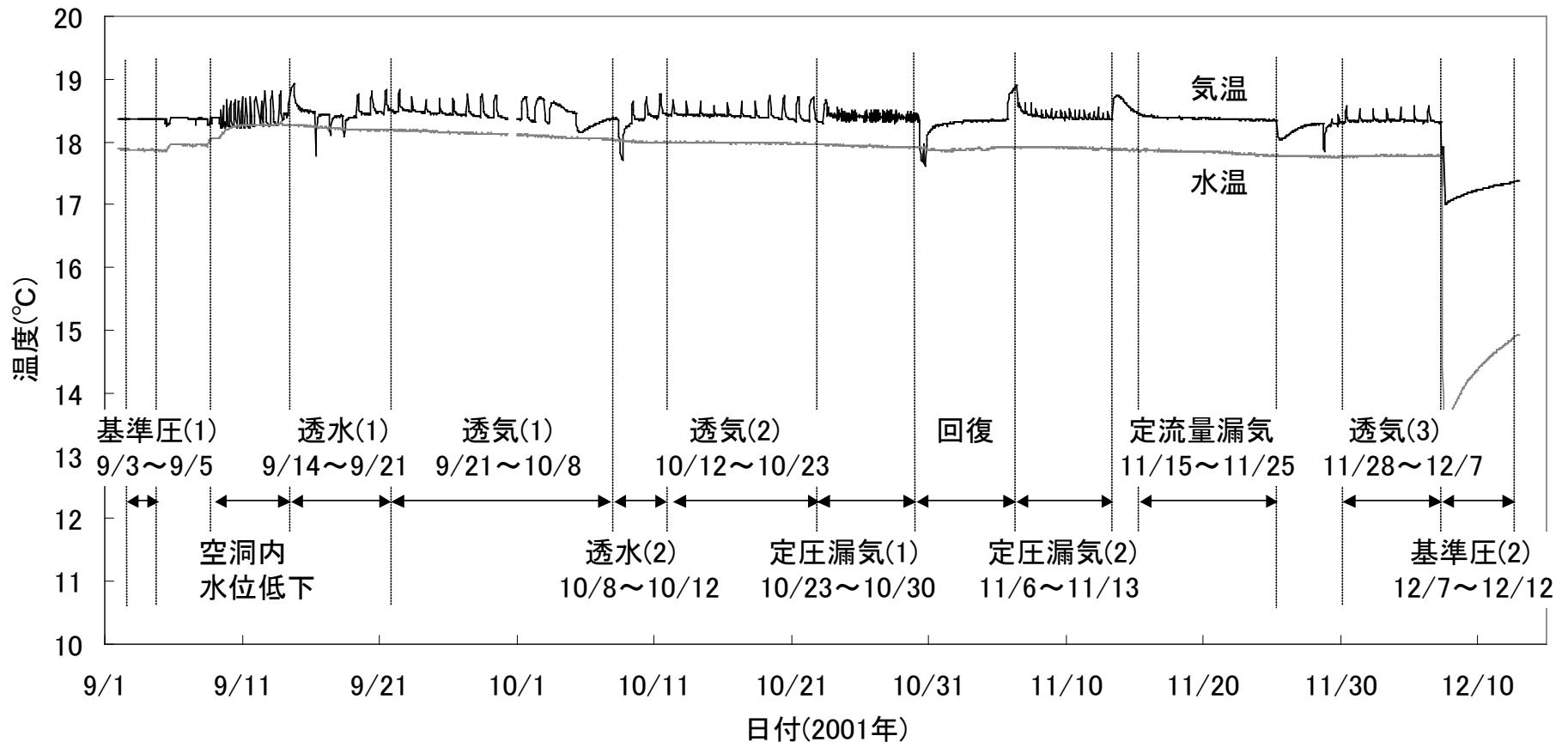
透気(1)~(3): 基準圧以上の空洞内圧で空気漏洩量を測定, 所定の空洞内圧に到達したあとシャットイン(空洞への気体の供給を停止)する方法を採用

定圧漏気(1), (2), 定流量漏気: 基準圧より大きい一定の圧力または一定の流量で空洞内を制御し, 空気漏洩量を測定.



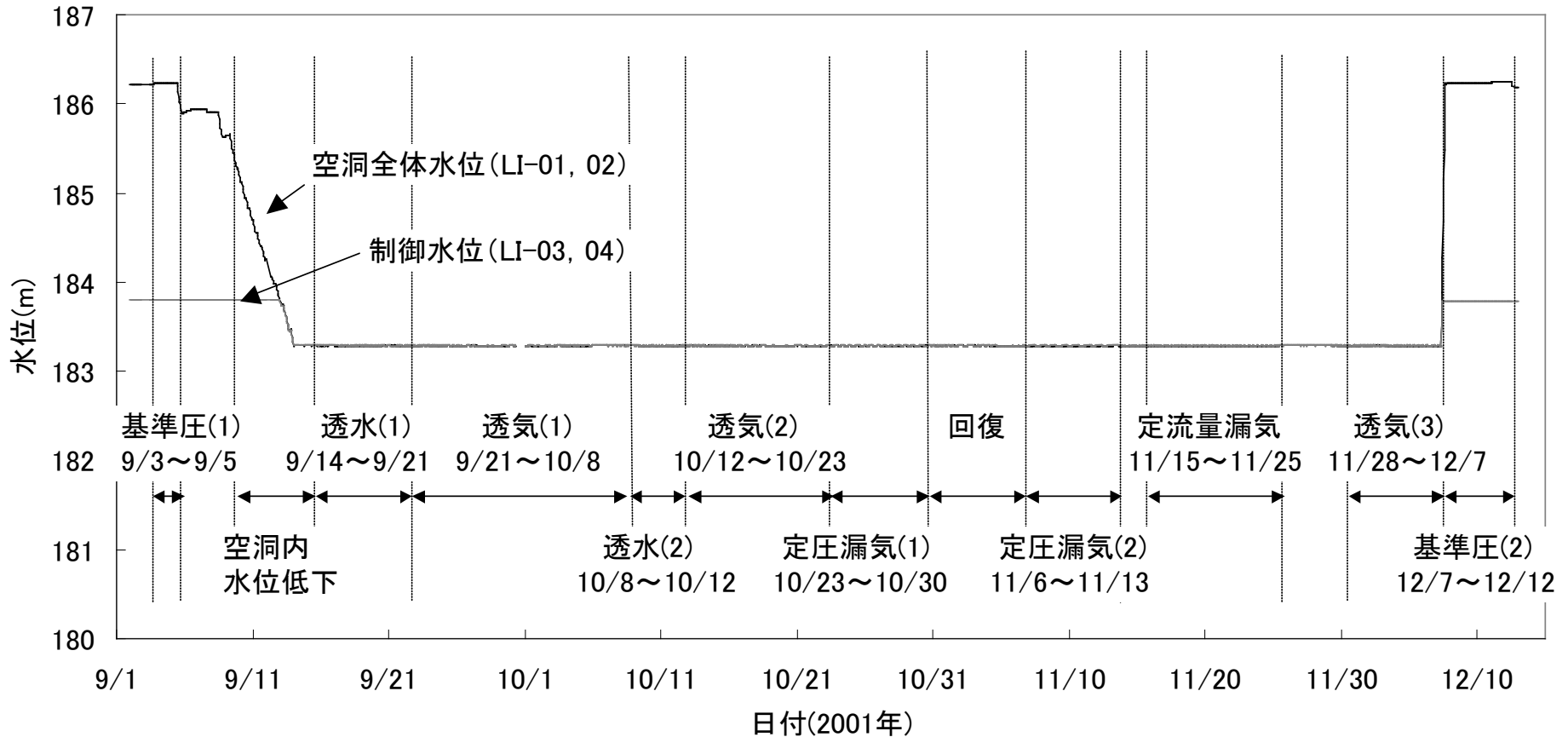
計測データ2 - 空洞内温度変化 -

- 基準圧(2)を除き各試験中では気温, 水温とも 1°C 以内の変動
 → 1°C 程度の変動であれば, 水, 空気の密度は大きく変動しないため, 後述する気液二相流解析では, 温度を一定と仮定した



計測データ3 - 空洞内水位変化 -

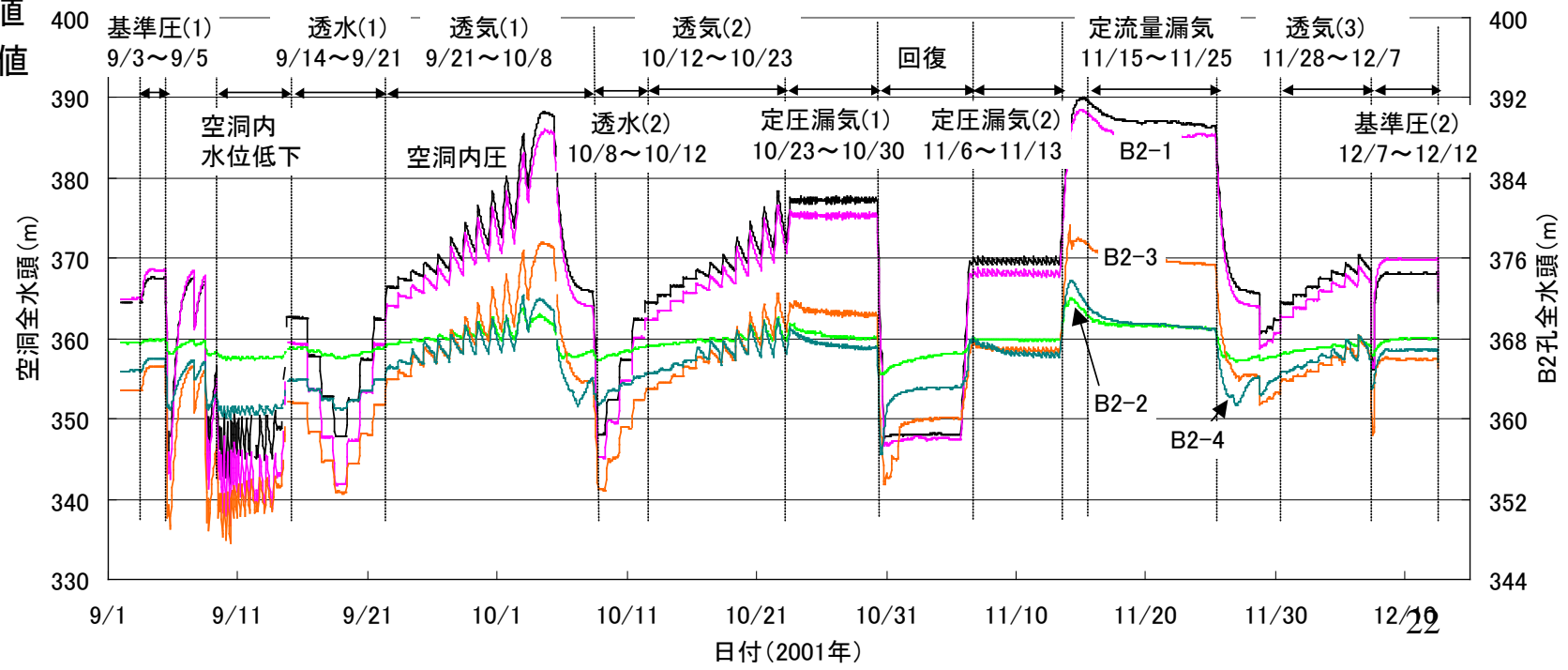
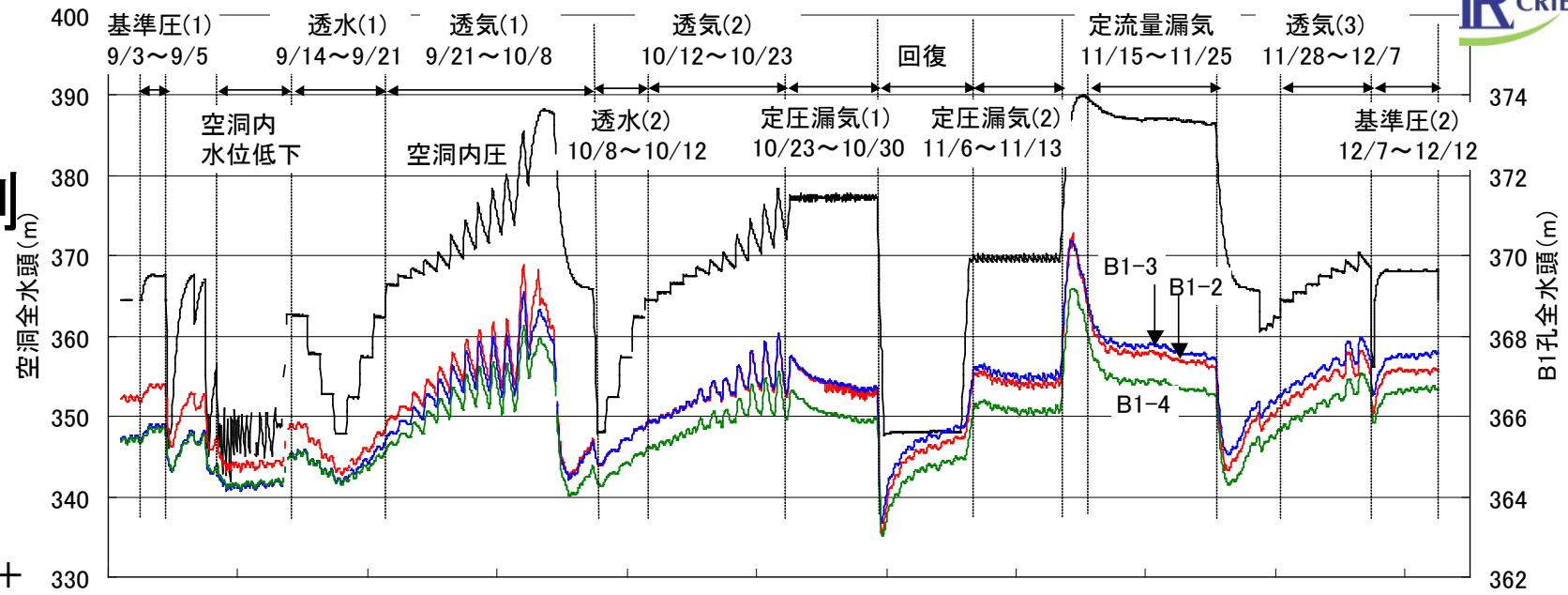
- 各試験期間中水位はほぼ一定
- 基準圧測定時はEL186.2m, 透水・透気試験時はEL183.3mであった。



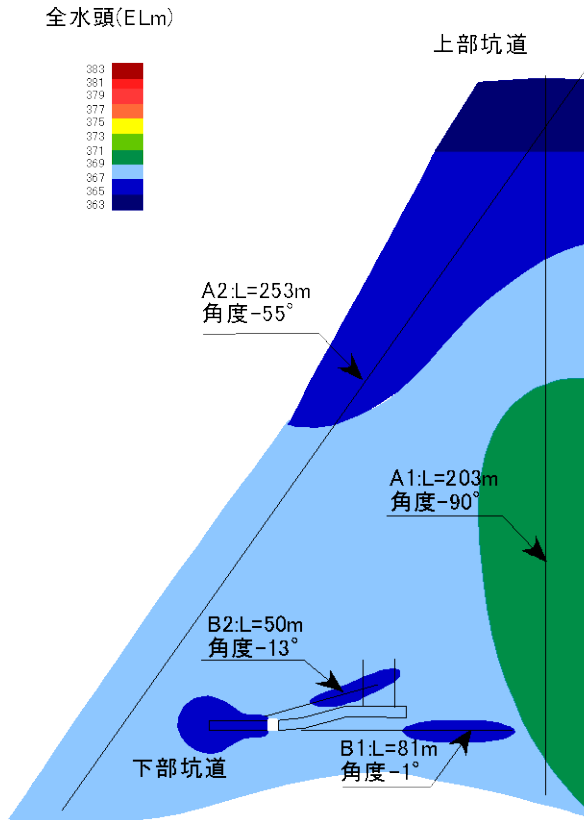
間隙 水圧 変化例 (B孔)

全水頭 =
センサ標高 +
センサ指示値
の水頭換算値

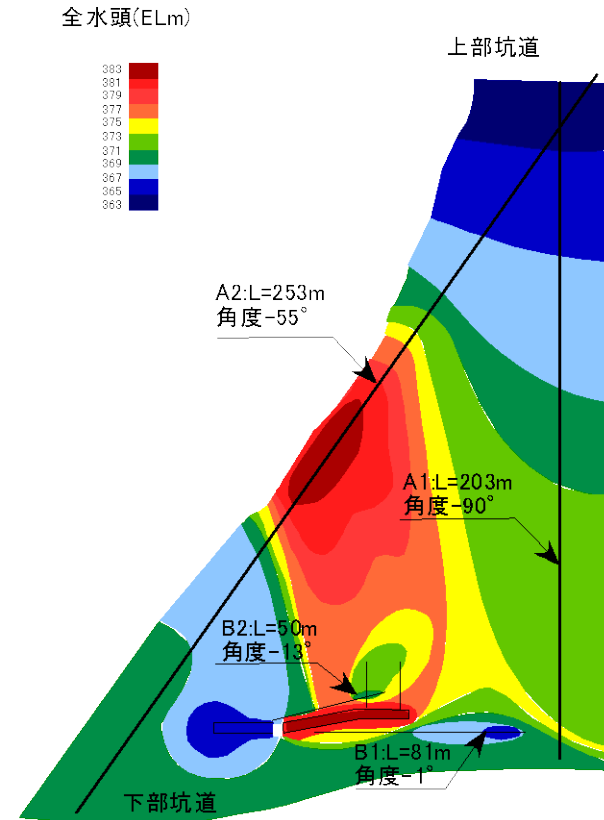
**B1-1,
B2-5は
測定不能**



実験結果1 (間隙水圧変化)



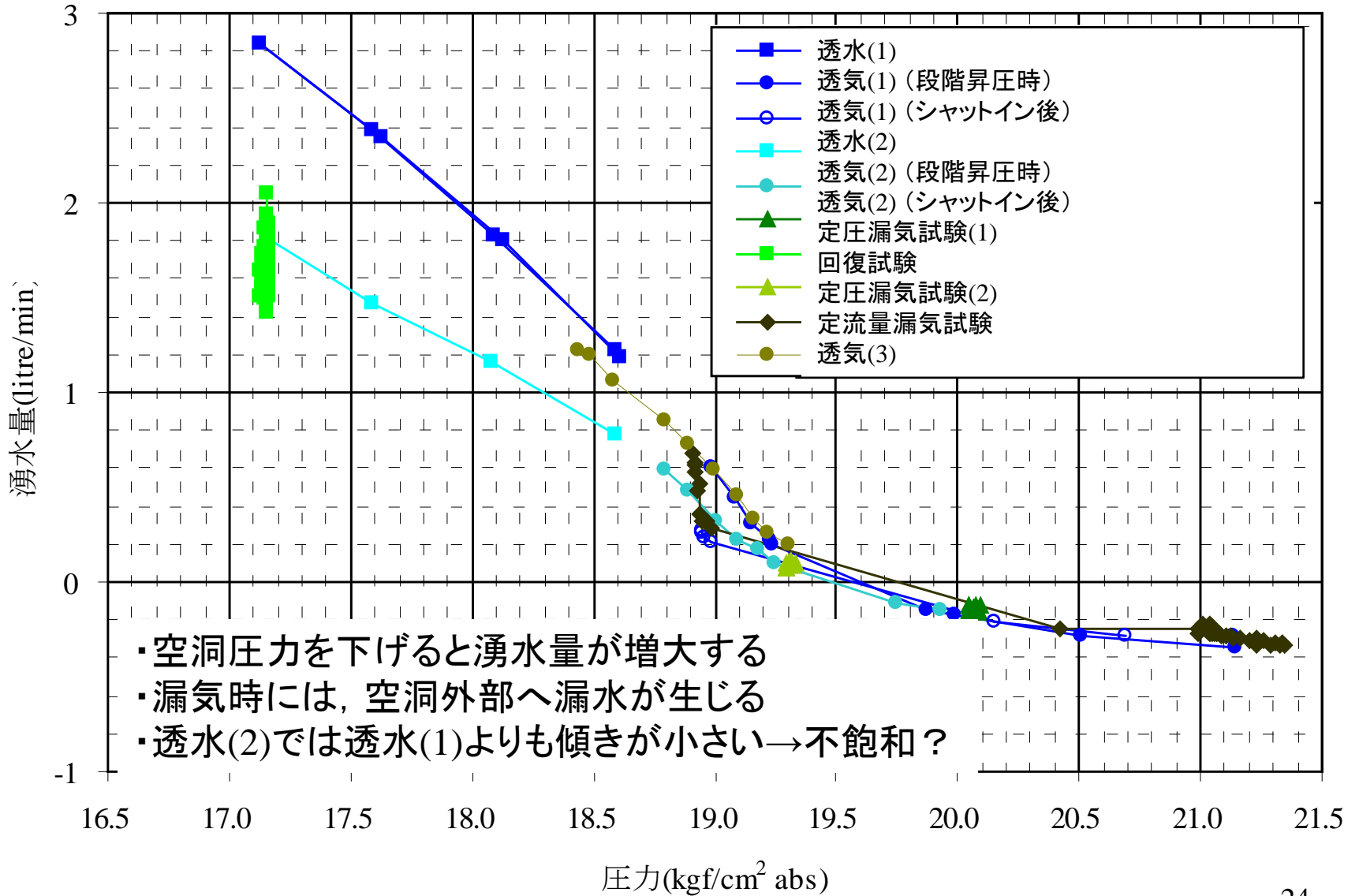
図面名称	全水頭分布(1)
試験日時	2001/09/23 09:00
試験名	透気(1)
試験圧力	基準圧Pr+0.0kgf/cm ²



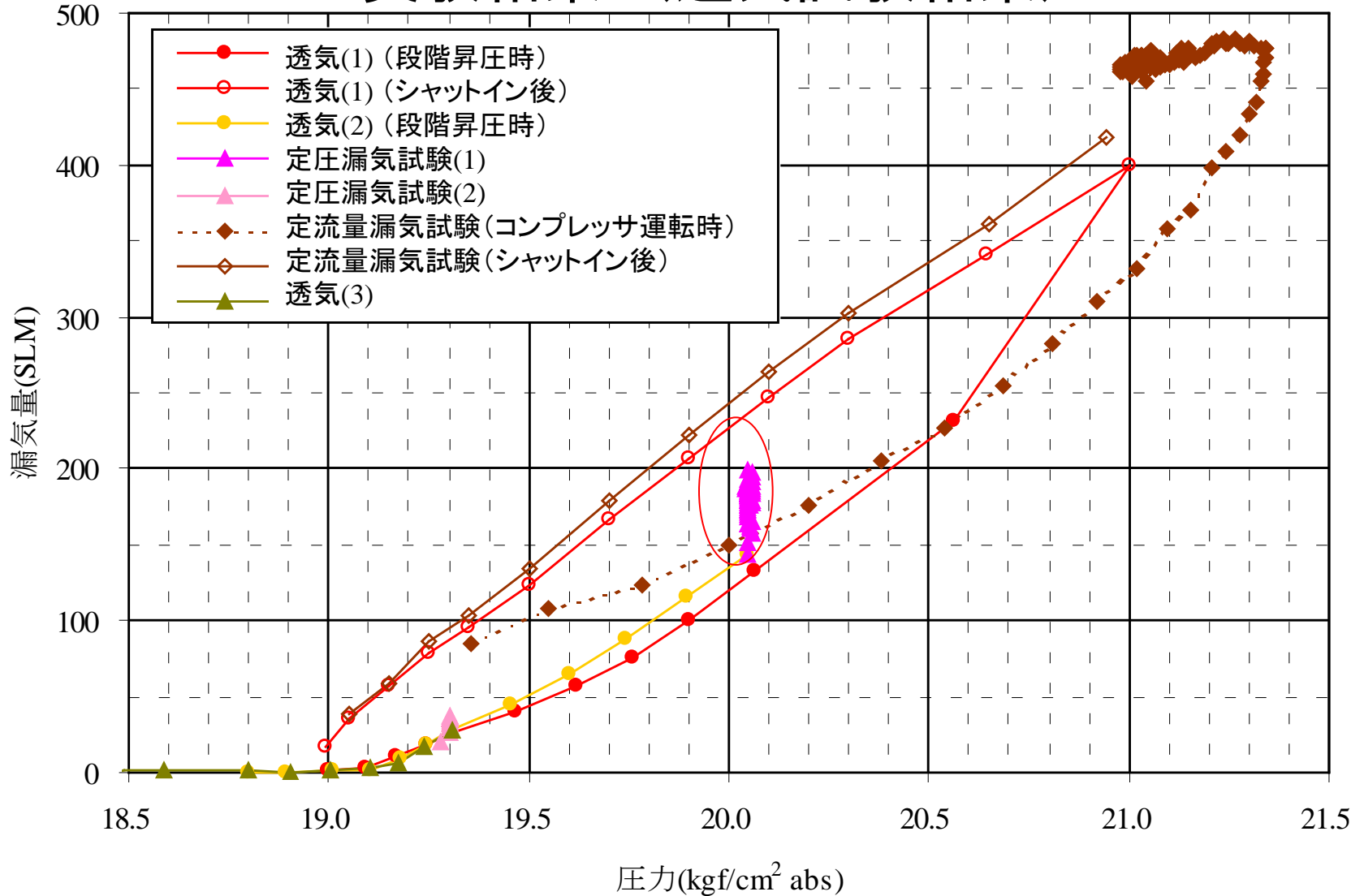
図面名称	全水頭分布(2)
試験日時	2001/10/05 08:00
試験名	透気(1)
試験圧力	基準圧Pr+2.3kgf/cm ²

・漏気前には空洞周辺の全水頭が概ね同様の値
 ⇒漏気後は、空洞上部への漏気にともない10~15m程度の圧力上昇

実験結果2 (透水試験結果)



実験結果3 (透気試験結果)



- ・基準圧(19kgf/cm²程度)までは漏気なし→水封機能が成立
- ・圧力を上げると漏気量増大. 漏気を続けると漏気量がさらに増大(○).

気液二相流解析の概要

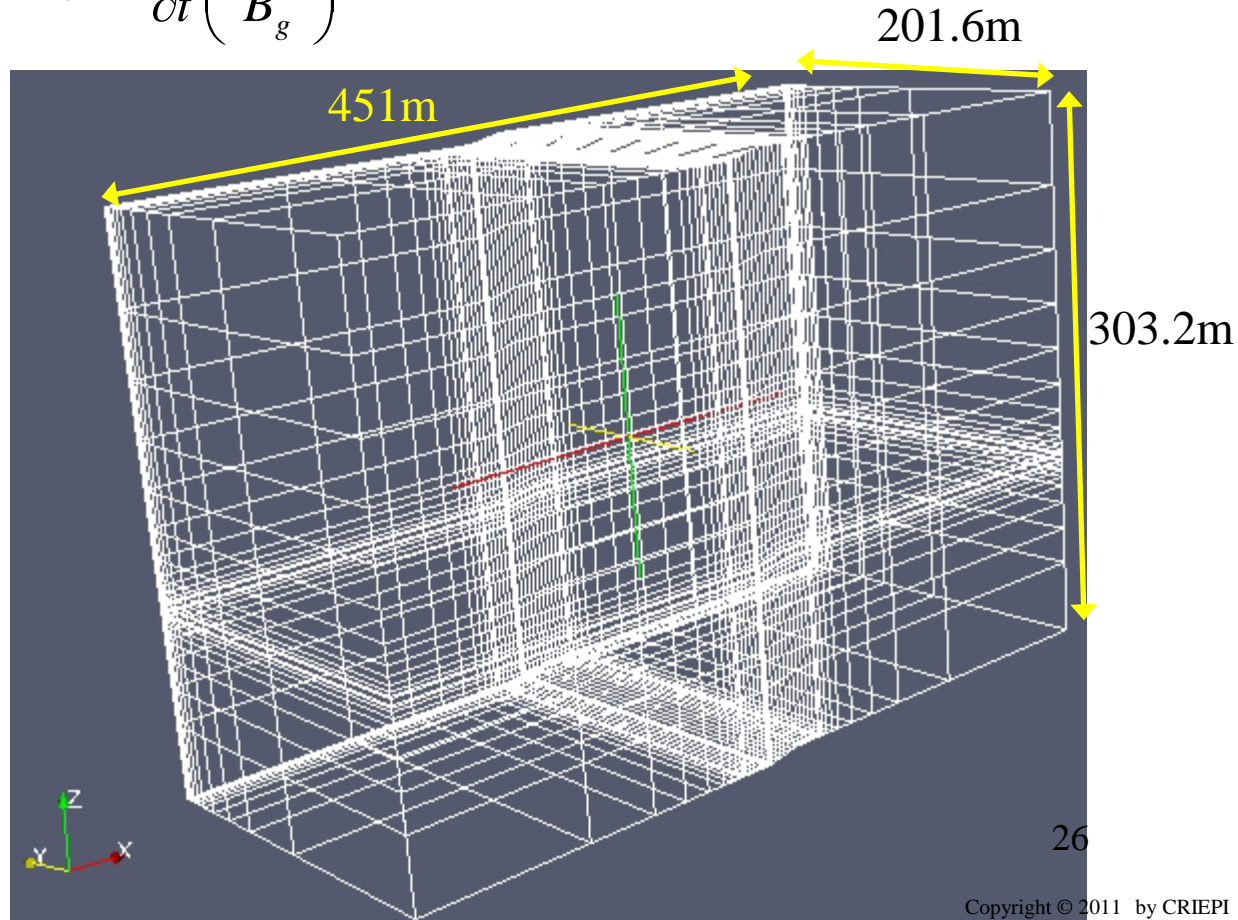
現場実験結果を再現し得る二相流特性を評価することを目的として、気液二相流解析を実施した。

[気液二相流解析の支配方程式]

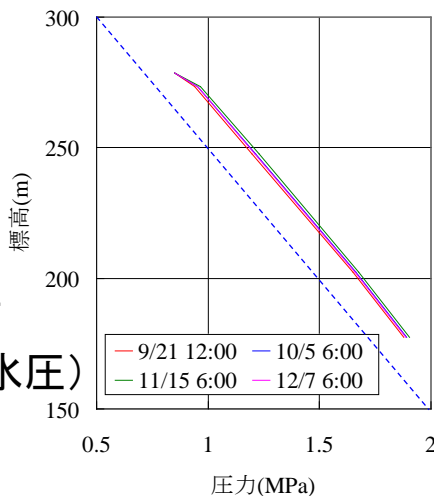
- 水相(添字 w):
$$\nabla \cdot \frac{Kk_{rw}}{\mu_w B_w} \nabla \Phi_w - q_{ws} = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\phi S_w}{B_w} \right)$$
 - 気相(添字 g):
$$\nabla \cdot \frac{Kk_{rg}}{\mu_g B_g} \nabla \Phi_g - q_{gs} = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\phi S_g}{B_g} \right)$$
- K : 絶対浸透率, k_r : 相対浸透率, μ : 粘度,
 B : 容積係数, Φ : ポテンシャル, q : 注入流量
 ϕ : 間隙率, S : 飽和率

[気液二相流解析の解析グリッド]

- x方向451m(39グリッド)
- × y方向201.6m(11グリッド)
- × z方向303.2m(22グリッド)
- 合計 9438グリッド



空洞から
40~50m
離れた
A1孔の
圧力分布
(ほぼ静水圧)



気液二相流解析の概要－初期条件, 境界条件, K , ϕ

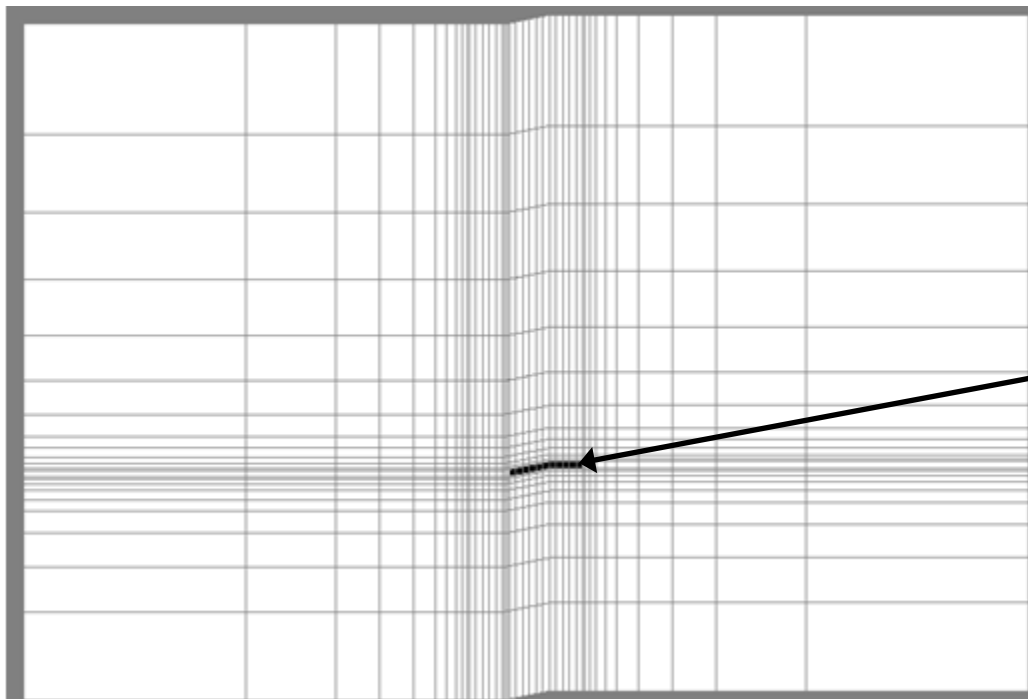
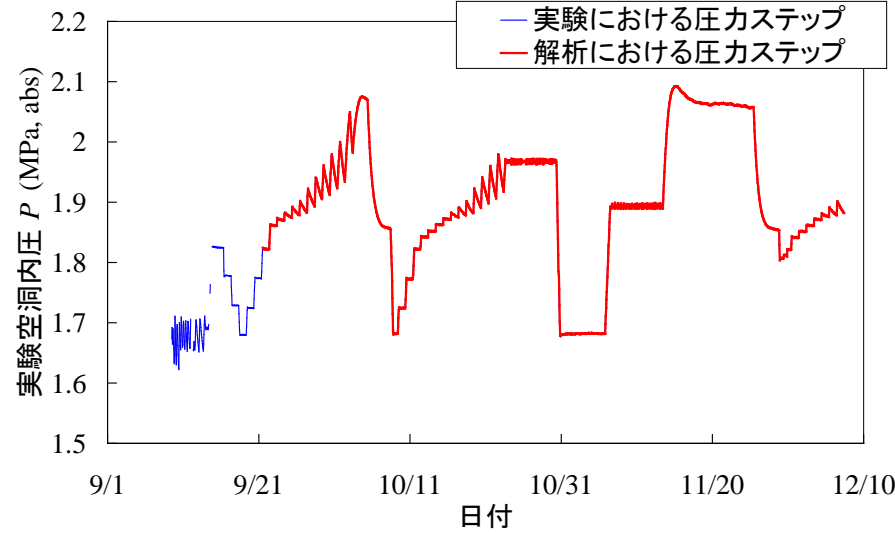
[初期条件] 静水圧分布

[境界条件]

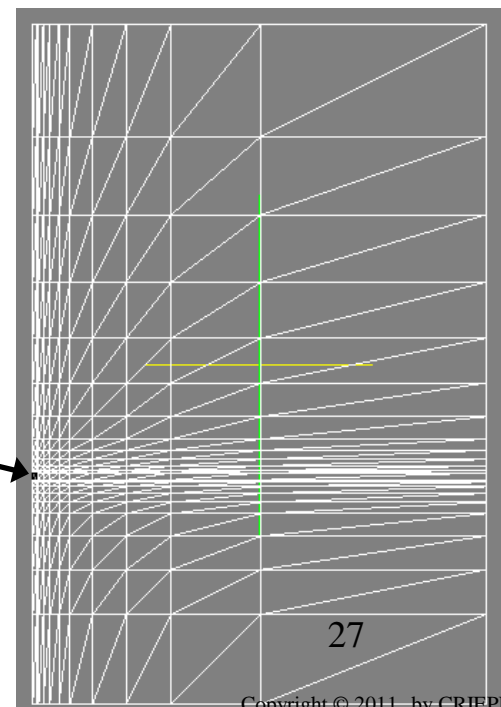
- グリッドの上面＝地下水位, 側面＝静水圧分布: 一定圧力境界
- グリッドの下面: 不透水境界(下図: グリッドの空洞を含むxz断面, 右下図: yz断面図)
- 境界条件のうち, 空洞部は現場試験を実施した全期間において計測された1時間毎の空洞内圧変動を与える(右図)
- 解析は2001/9/21 12:00を時刻0として実施した.

[絶対浸透率 K , 間隙率 ϕ]

- 現場評価結果に基づき $K=8.19 \times 10^{-15} \text{m}^2$, $\phi=0.2\%$



空洞



二相流特性 (P_c, k_r)

- Brooks&Corey (Corey(1954))による有効浸透率 S^* と P_c の関係

$$S_w^* = \frac{S_w - S_{wir}}{S_{wmax} - S_{wir}} = \left(\frac{P_{th}}{P_c} \right)^\lambda \Rightarrow P_c = P_{th} \cdot (S_w^*)^{-\frac{1}{\lambda}}$$

S_w : 飽和率, S_{gir} : 不動水飽和率, S_{wmax} : 最大飽和率, P_{th} : スレッショルド圧, λ : 定数

- Mualem(1976)による気相相対浸透率 k_{rg} と S^* の関係

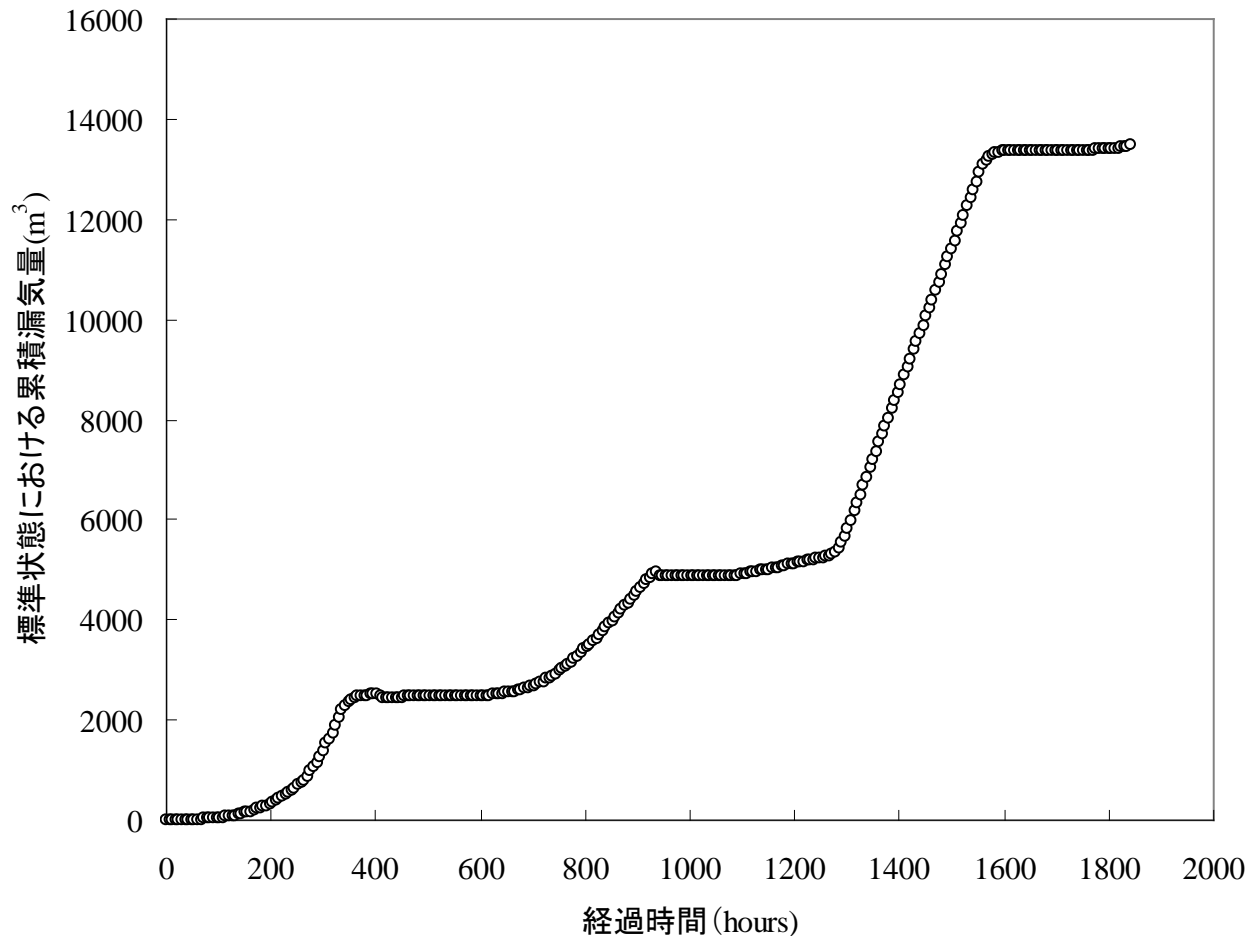
$$k_{rg} = \sqrt{1 - S_w^*} \left\{ \frac{\int_{S_w^*}^1 dx/h(x)}{\int_0^1 dx/h(x)} \right\}^2$$

- 上述のBrooks&CoreyとMualemをそれぞれ組み合わせ、二相流モデルを構築する (Dury et al.(1999))

$$k_{rg} = \sqrt{1 - S_w^*} \left\{ 1 - (S_w^*)^{1 + \frac{1}{\lambda}} \right\}^2 \qquad k_{rw} = (S_w^*)^{2.5 + \frac{2}{\lambda}}$$

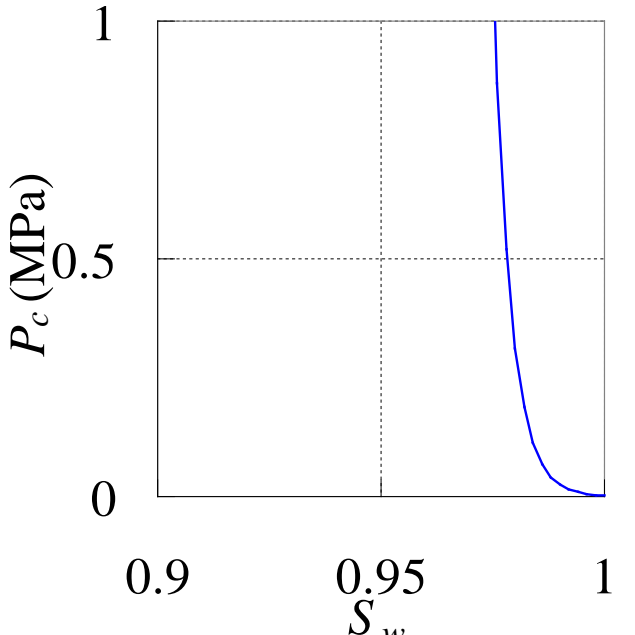
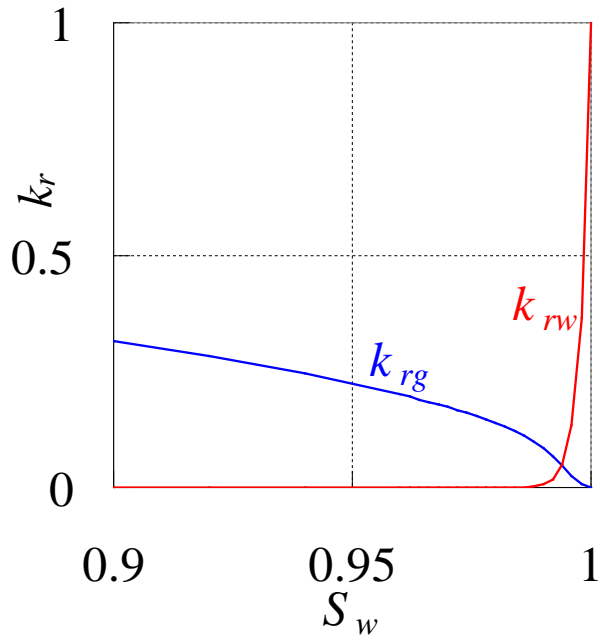
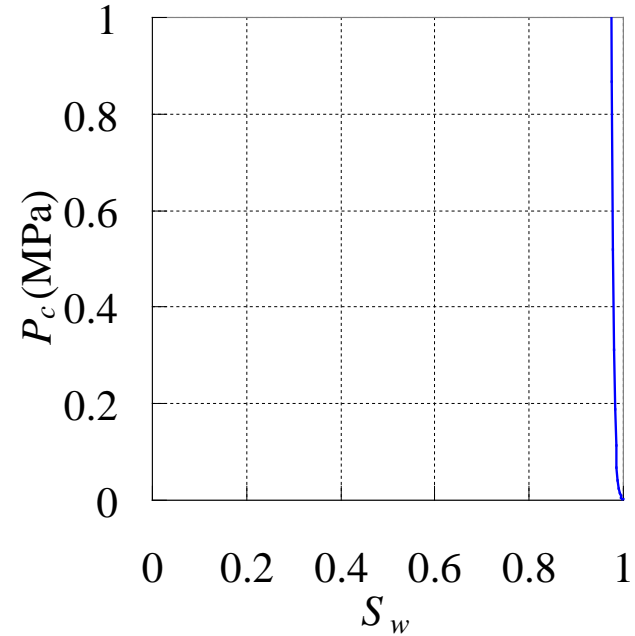
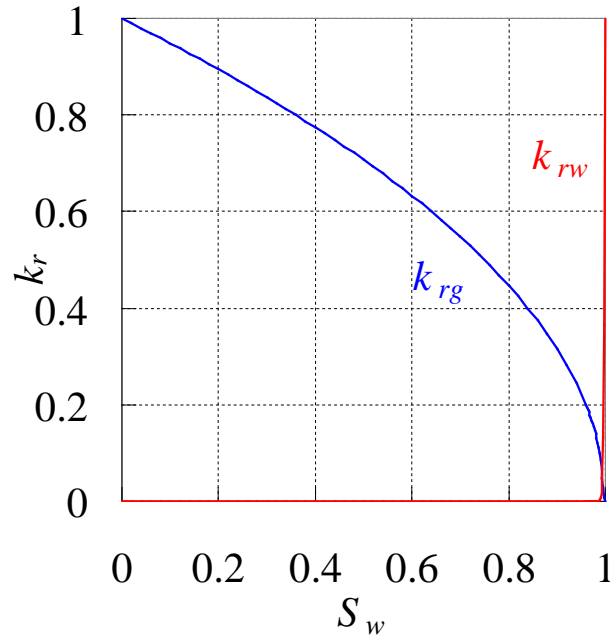
パラメータフィッティング方法

- 各モデルごとのパラメータ (P_{th} , λ) を変化させて、透気(1)～透気(3)の期間を対象としたシミュレーションを実施する.
- シミュレーション開始の時刻(2001/9/21 12:00)を基準にして、経過時間ごとの圧力変動に基づいた漏気量(計算値)を算出する.
- 現場において測定された漏気量の実測値(下図)と計算値との比較を行うことにより、実測値を再現可能なパラメータを求める



パラメータフィッティングで得られた二相流モデル

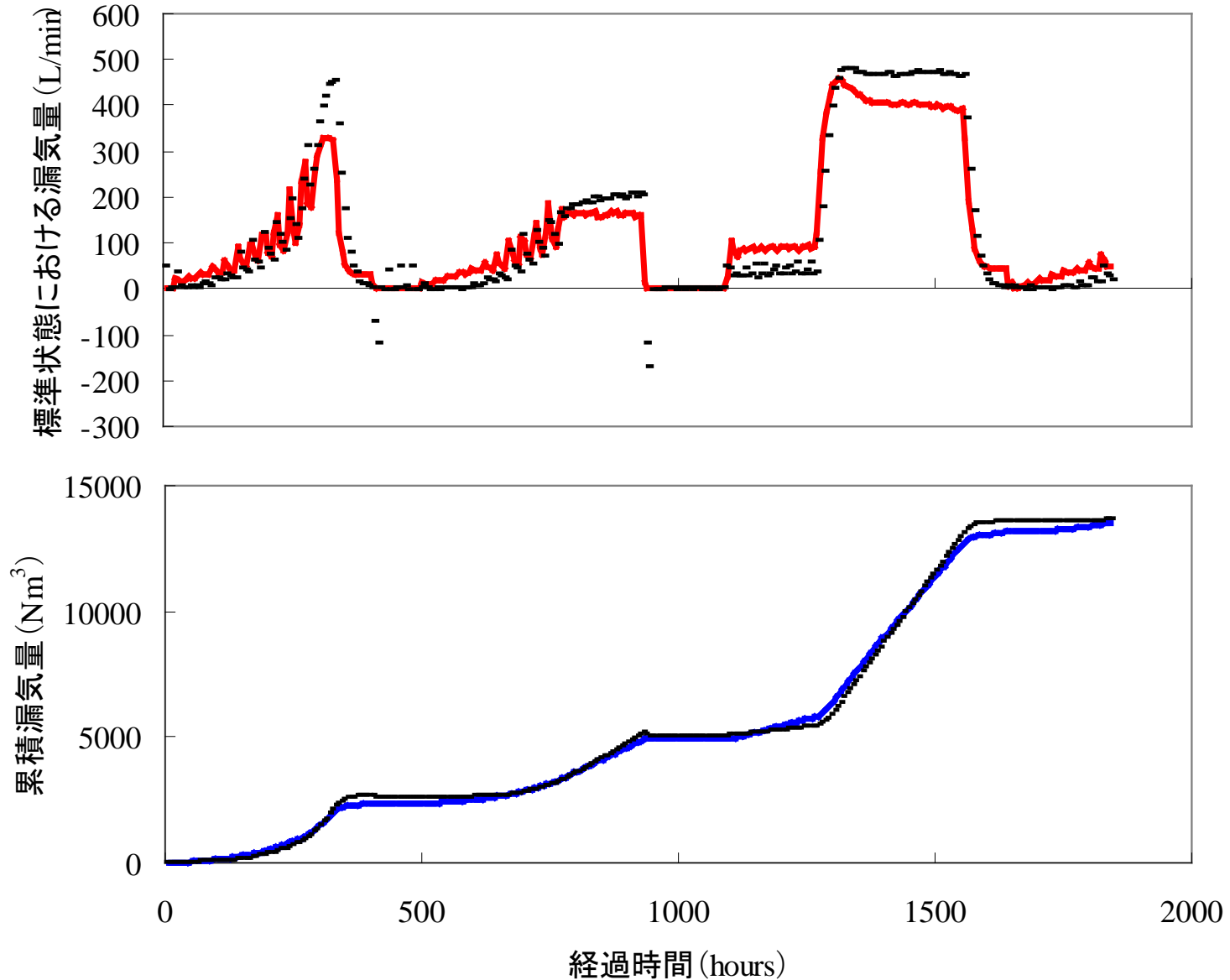
- 相対浸透率は, k_{rg} については上に凸のプロファイルとなり, k_{rw} については $S_w > 0.9$ で, S_w の増加に伴い急激に増加するプロファイルとなる.
- P_c については, S_w が 1.0 から減少すると急激に上昇するプロファイルとなることが分かる.



上段: 全体図, 下段: 拡大図

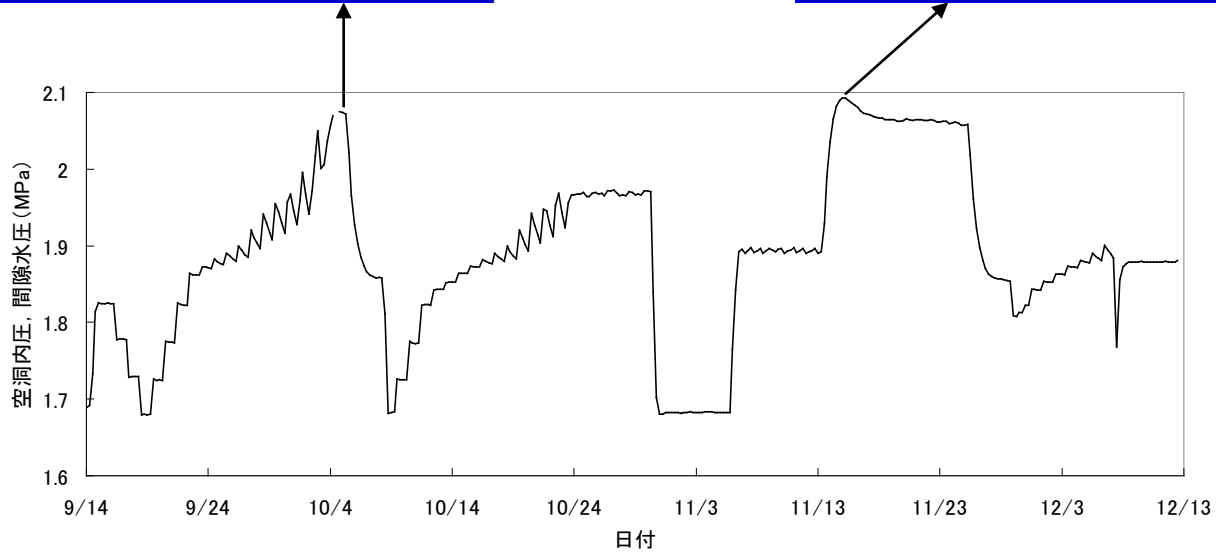
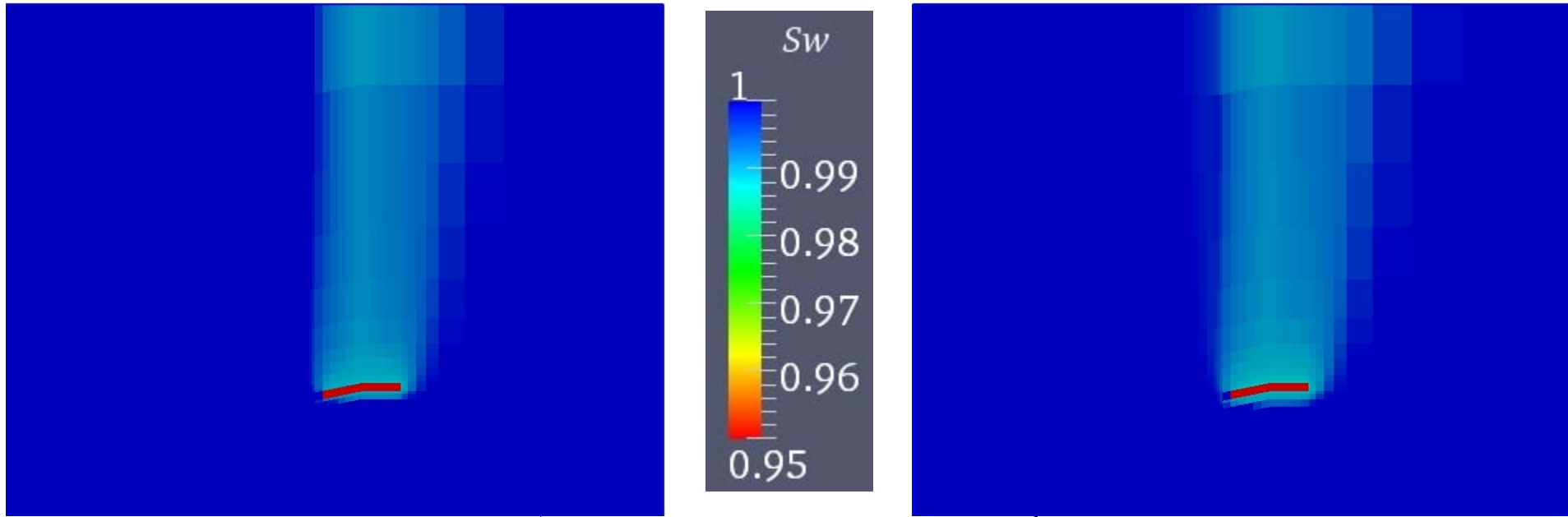
パラメータフィッティング結果

- $P_{th}=2\text{kPa}(0.002\text{MPa})$, $\lambda=0.004$ とした場合、概ね実測値を再現する。



気液二相流解析結果例：飽和率分布

空洞直上部(周辺)を主として1~2%程度の飽和率の低下が見られる



現場実験結果まとめ

[実験結果]

- 貯槽空洞から漏気した場合、空洞上部の間隙水圧が10～15m程度上昇する。
- 空洞内圧を周辺間隙水圧より小さくすると湧水が生じた。一旦漏気した後に再び湧水させた場合、湧水量の減少が見られた。
- 空洞内圧を周辺間隙水圧より大きくすると漏気が生じた。漏気後、空洞内圧を低下させて再度上昇すると同じ漏気開始圧となり、水封機能の復元性が確認できた。
- 今回の現場実験により、トンネル形式の貯槽において水封方式による高压空気貯蔵の可能性が実証できた。

[二相流特性の同定]

- 実験で計測された漏気量を再現する二相流特性を求めるため、二相流解析を実施した。
- この結果、相対浸透率は、 k_{rg} については上に凸のプロファイルとなり、 k_{rw} については $S_w > 0.9$ で、 S_w の増加に伴い急激に増加するプロファイルとなることが分かった。
- P_c については、 S_w が1.0から減少すると急激に上昇するプロファイルとなることが分かった。

電力貯蔵技術への応用(展望)

従来になかった電力貯蔵へのニーズ

3. 11の東日本大震災により、国・電気事業で進められてきた**原子力発電**および燃料の再処理は、**既定の方針とできなくなりつつある**

これに代替する可能性のある**火力発電**についても、資源の有限性、海外依存性を考慮すると、**恒久的に依拠することができなくなるもの**と考えられる

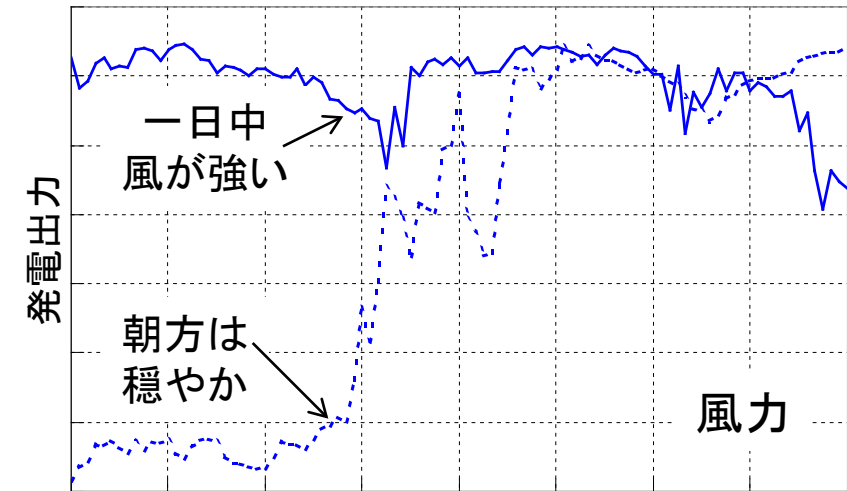
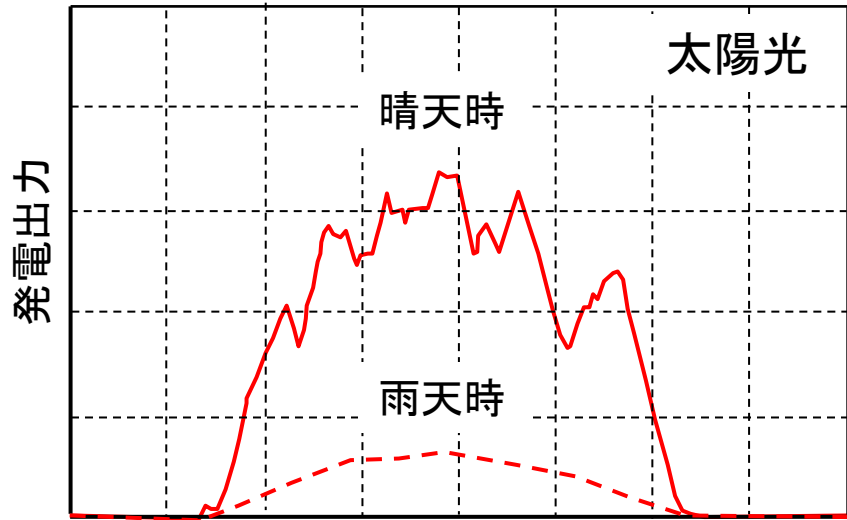
太陽光、風力など**再生可能エネルギー**を組み合わせることにより不足するエネルギーを補う必要性が今後増すと想定される

再生可能エネルギーの問題点として、**時間軸でみた場合の供給の不安定性**が挙げられる

この不安定性を解消するためには、エネルギー需給バランスを考慮し、必要に応じて供給量を調整することが可能な、**大規模電力貯蔵技術を開発する必要がある**

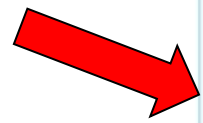
⇒ 従来の**ピークシェービング**としての役割以外に、再生可能エネルギーを用いた場合の**系統運用の負荷軽減**の役割を目指す

再生可能エネルギーの出力と電力需要の関係

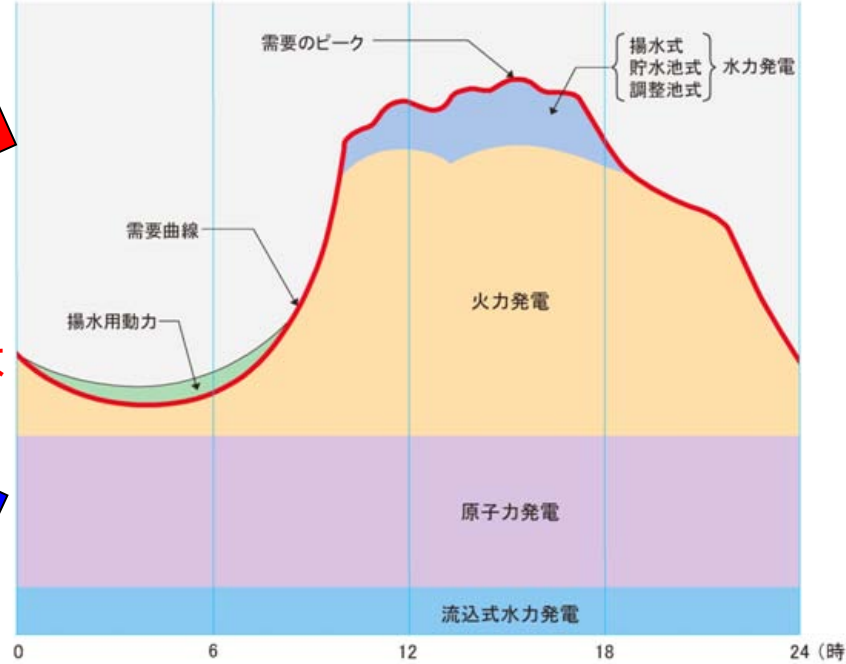
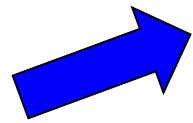


4:00 6:00 8:00 10:00 12:00 14:00 16:00 18:00 20:00

時刻

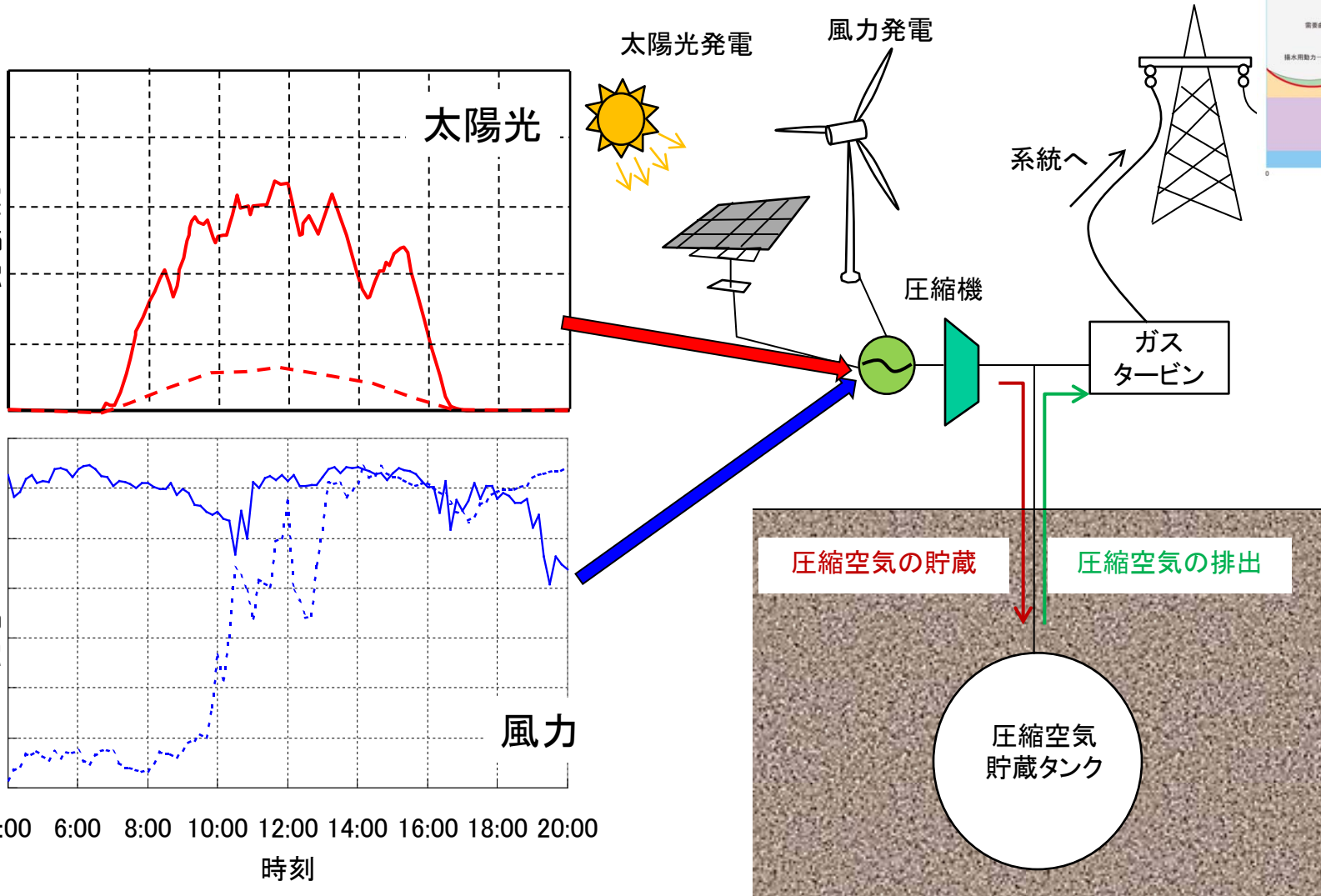
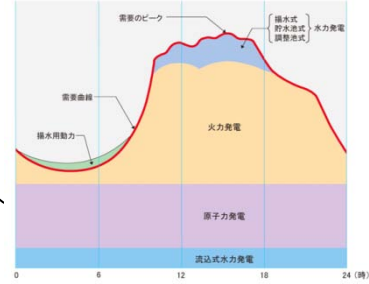


このまま
系統に
繋ぐのは
困難



資源エネルギー庁「原子力2010」(再掲)

電力貯蔵システムとしてのCAESを用いた系統運用



太陽光・風力等再生可能エネルギーで発電されたエネルギーを用いて、圧縮空気を一旦岩盤内に貯蔵し、需要に合わせて発電し、系統に繋ぐ。

電力貯蔵技術の比較(内山, 1997)

		揚 水	圧縮空気	蓄電池	超電導	フライ ホイール
貯蔵特性	規模 [万 kWh]	中～大 50～1000	中 50～250	小～中 ～80	小～中 ～10	小 ～1
	エネルギーの種類	位 置	圧 力	化 学	磁 気	運 動
	エネルギー密度[万 kWh/m ³]	～1	8	100	10	50
	貯蔵効率[%]	70	75～80	70～75	80～90	～70
	総合効率 [†] [%]	25	27～29	25～27	29～32	～25
運転特性	起動・停止	1分程度	20～30分	瞬 時	瞬 時	瞬 時
	負荷追随性	大	中	大	大	大
	信頼性	有	有	有	確立中	確立中
	寿命(プラント機械と 貯蔵施設の平均的な値)	40年以上	20年以上	10年以上	30年程度	10年以上
建設費	発電部[万円/kW]	14	14	4 ^{††}	4 ^{††}	4 ^{††}
	貯蔵部[万円/kWh]	1	0.5～1.5 ^{††}	2～3 ^{††}	2～3 ^{††}	15以上 ^{††}
技術確立時期		実用化済	硬岩・軟岩 2000～ 2010年	2000年頃	2010年 以降	不 明
建設期間[年]		8～12	4～7	2～3	2～5	1～2

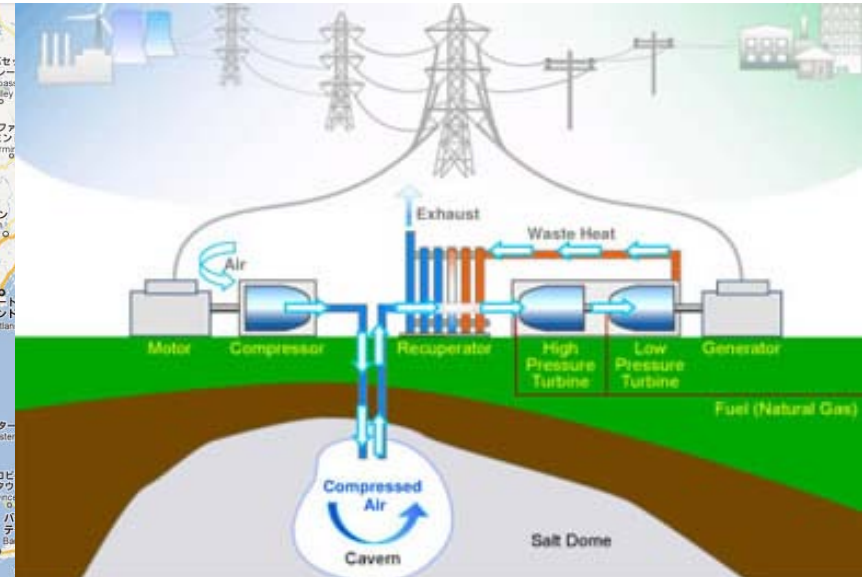
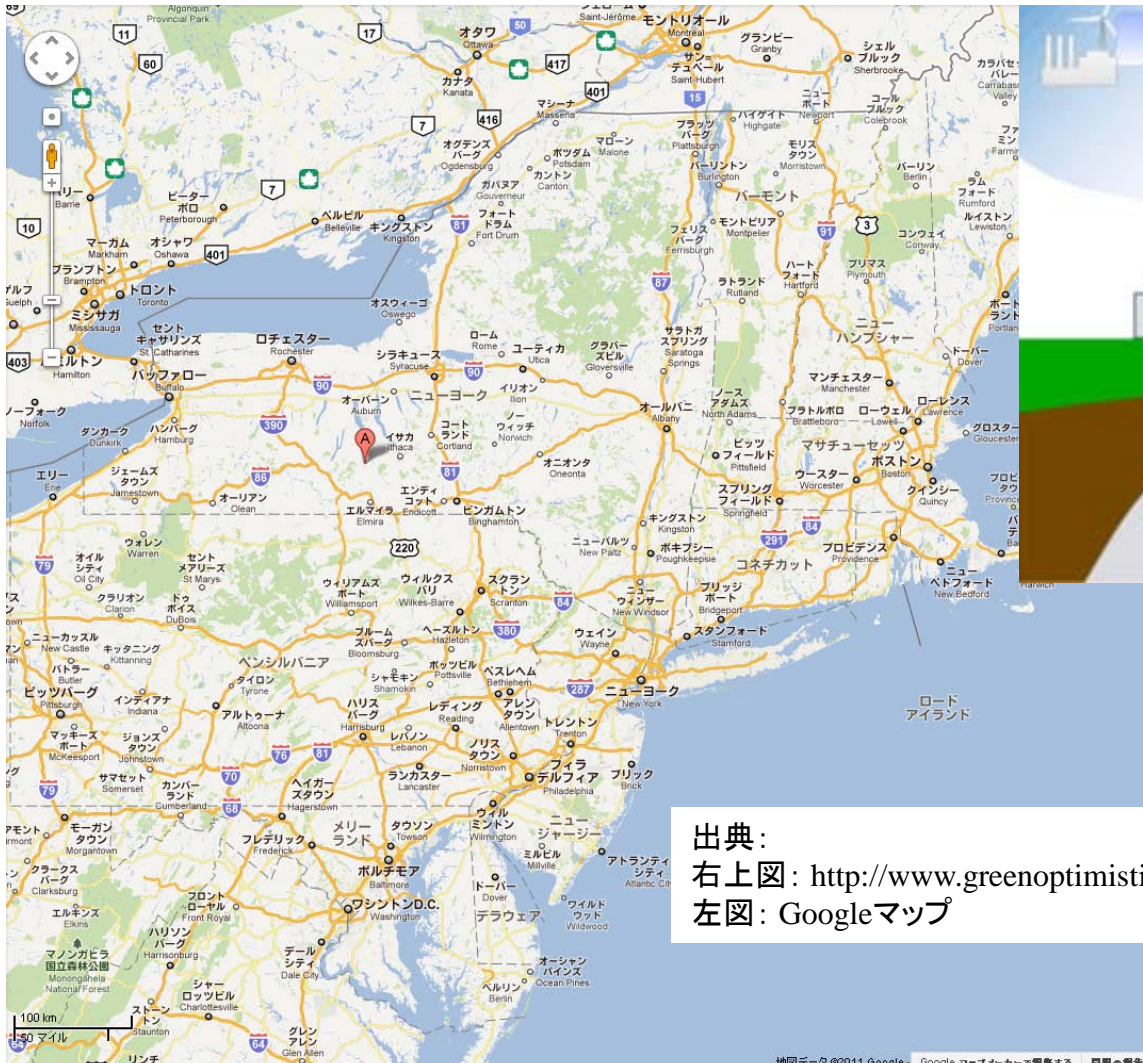
† 発電効率(送電端)×貯蔵効率

†† 技術進歩を見込んだ商用化時のコスト

⇒3. 11以降の状況に鑑み、技術の信頼性やリスクを踏まえ、再評価する必要性あり

外国での電力貯蔵のためのCAES事例

NYSEG (New York State Electric and Gas) により, New York州郊外 (Reading, Schuylers County) でCAESを実施した場合のFSを2011年4月より開始
(<https://www.nyseg.com/OurCompany/News/2011/040511caes.html>)



出典:

右上図: <http://www.greenoptimistic.com/2010/03/18/compressed-air-energy-storage-plant/>

左図: Google マップ

電力貯蔵技術としてのCAESーまとめと今後の展開

[CAESの展望]

- これまでは、CAESは主に電力需要に対するピークシェービングとしての役割として考えられてきた。
- しかしながら、3. 11を経て、原子力に対する考え方の変化から、再生可能エネルギーへの比重を大きくしていく機運が高まりつつある。
- 再生可能エネルギー導入のためにはどうしても電力貯蔵技術が必要となり、大規模な貯蔵を考えるとCAESの需要が今後見込まれる。

[今後の課題]

- 大規模電力貯蔵としてのCAESの成立性評価(適正規模, 経済性, etc)。
- 立地可能性: 水封(or 岩盤気密 or ライニング)に適した岩盤の立地調査 ⇒ 気密性確保に関する評価。
- 地下岩盤への圧縮空気貯蔵にともなう環境影響評価。