



最終講義
「名古屋大学での42年」

2015年3月12日

15:00～17:00

ES総合館 1F ESホール

山本 一良



本日の話の内容

同位体分離に関する研究

同位体分離の数理的基礎理論を構築

「注目成分に関するカット」の非近似解を発見

カスケード方程式を線形分解することに成功

「分離パワー」概念に内在する矛盾の理由解明

多成分分離カスケード方程式の線形分解に成功

多成分分離パワーを支配する式の解を導出

同位体分離実験室

手作り予備実験装置(蒸留塔, 熱拡散塔)

ロスアラモス科学研究所

同位体分離実験室の設計と実験

熱拡散塔2次元分離性能解析手法の開発

熱拡散塔解析簡単化モデルの構築

「深冷壁熱拡散塔」概念の発見

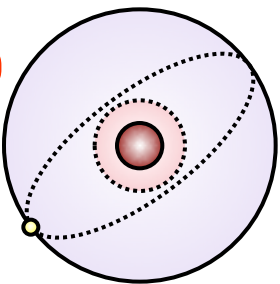
国際会議(SPLG'98), 同位体COEなど

同位体とは？

＜水素の同位体＞

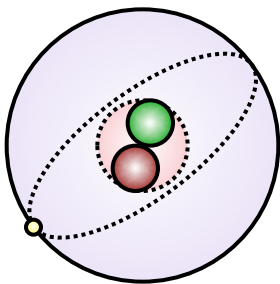
軽水素原子 (^1_1H)

陽子 1
中性子 0
電子 1



重水素原子 (^2_1H , D)

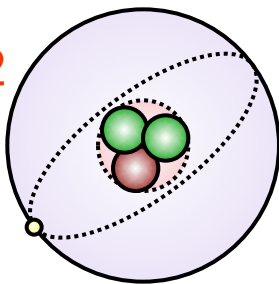
陽子 1
中性子 1
電子 1



存在比 1.5×10^{-4}

三重水素原子 (^3_1H , T)

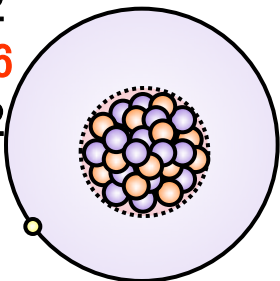
陽子 1
中性子 2
電子 1



存在比 $10^{-17} \sim 10^{-16}$

＜ウランの同位体＞ ウラン238 ($^{238}_{92}\text{U}$)

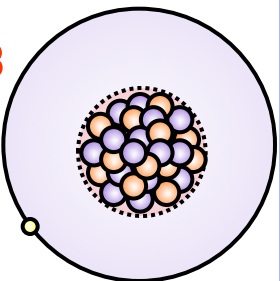
陽子 92
中性子 146
電子 92



存在比 99.3%

ウラン235 ($^{235}_{92}\text{U}$)

陽子 92
中性子 143
電子 92



存在比 0.7%

なぜ同位体分離が必要か？

- 核分裂炉 軽水炉燃料のためのウラン(235)濃縮
反応度制御のためのボロン-10 濃縮
重水炉のための水素同位体分離(重水の製造・精製)
原子炉や核燃料再処理工場からのトリチウム分離・回収
- 核融合炉 燃料の重水素, トリチウムの生産・精製
主燃料系, ブランケット系プロセス
リチウム-6 濃縮
- 医療, 診断, トレーサー利用

同位体は、元素としては同じなので、分離することは極めて困難

カスケード理論の 位置づけ

注目成分(例えばウラン235)を目標とする濃度まで濃縮し, ある一定量を得ようとするとき, 1台の分離機で実現することは困難.

そこで,

多数の分離機を

濃縮度 を稼ぐためには **直列に**,
量 を稼ぐためには **並列に**

結合して所定の製品(プロダクツ)を得る.

このシステムを**カスケード(Cascade)**と呼ぶ.

カスケード理論は, **分離要素**と**分離プラント**とを
結ぶ機能を持つ.

分離の尺度・評価に**分離パワー**の概念.

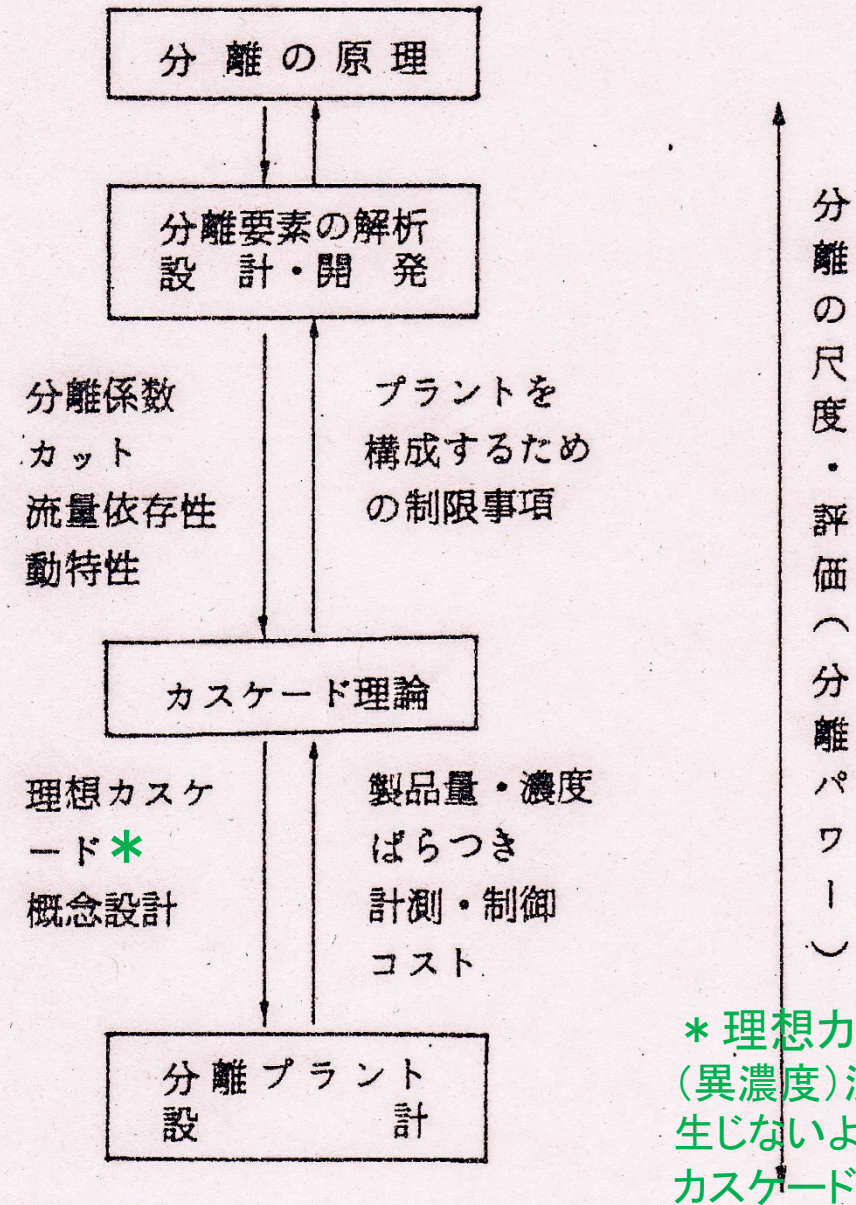


図 1.1: カスケード理論の位置づけ

カスケード(Cascade)

処理量の足りない分は並列に結合

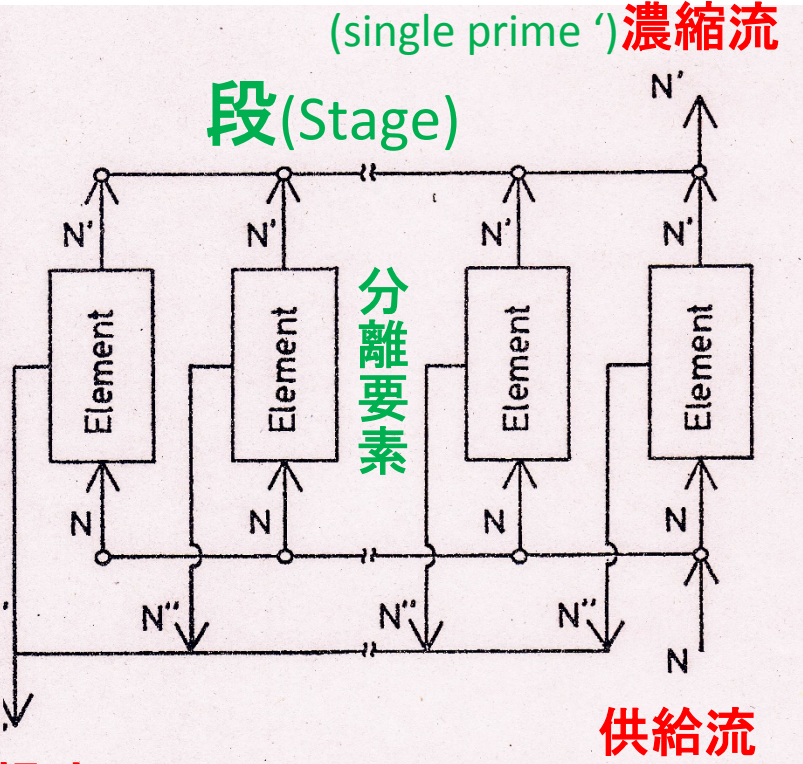
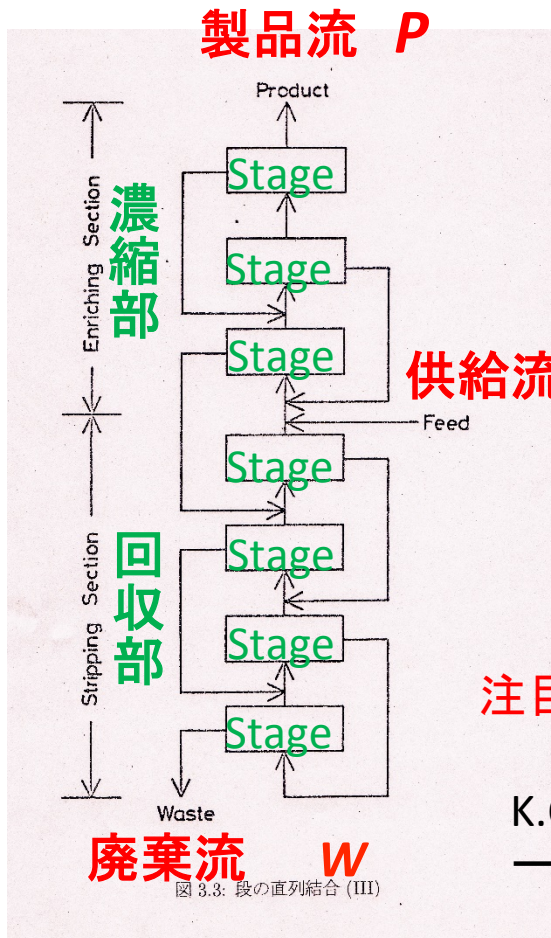


図 3.1: 段：分離要素の並列結合
(double prime “)

分離の程度が足りない分
は直列に結合



注目成分モル分率
表記法
K.Cohen: N
一般的: x

カスケード方程式①

物質収支式(カスケード全体) 製品流量から供給流量を表す

2成分混合物 $F = P + W$

注目成分 $Fx_F = Px_P + Wx_W$

$$F = \frac{P(x_P - x_W)}{x_F - x_W}, \quad W = \frac{P(x_P - x_F)}{x_F - x_W}$$

注目成分モル分率
表記法

K.Cohen: N
一般的: x

製品濃度が高いほど,
廃棄濃度が高いほど
多量の供給流量が必要

分離要素

- **カット**: 濃縮流量の供給流量に対する割合

$$\theta = \frac{L'}{L}, \quad \bar{\theta} = \frac{L''}{L}$$

漏れがなければ
1 - θ

- **物質収支**: 混合物流量と注目成分流量

$$L = L' + L''$$
$$Lx = L'x' + L''x''$$
$$x = \theta x' + (1 - \theta)x''$$

注目成分モル分率
表記法

K.Cohen: N
一般的: x

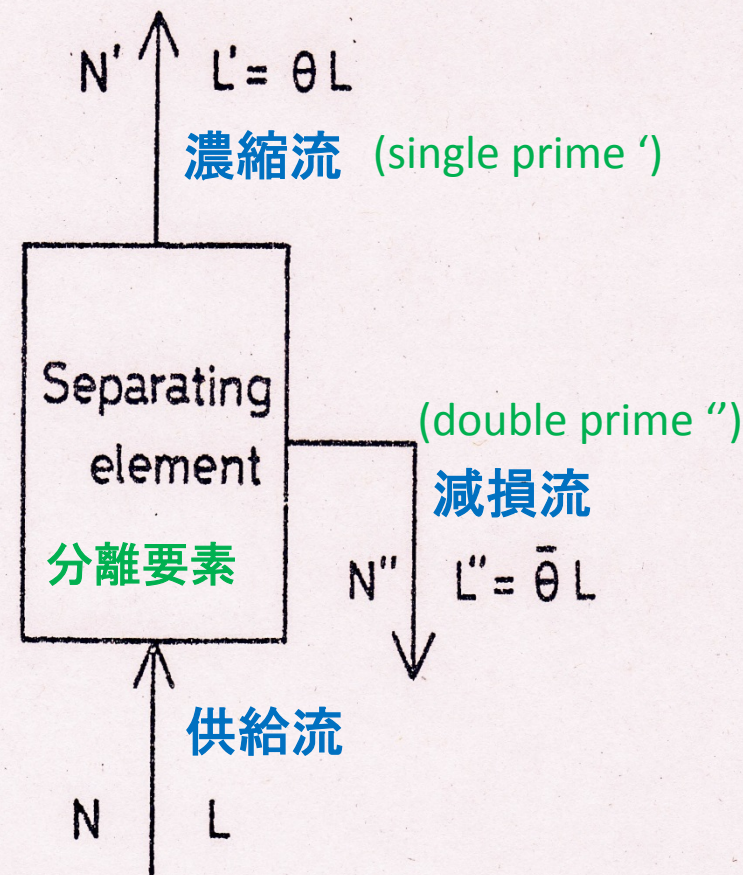


図 2.1: 分離要素の基本型

分離係数

注目成分 (ex. U-235) の
非注目成分 (ex. U-238) に対する

存在比: R

(Abundance Ratio)

注目成分の非注目成分に対する

濃縮側分離係数 α

(heads separation factor)

減損側分離係数 β

(tails separation factor)

2成分

$$R = \frac{x}{1-x} \quad \begin{matrix} \text{[U-235]} \\ \text{[U-238]} \end{matrix}$$

存在比で定義する理由:

統計的分離プロセス (遠心分離, 蒸留, 熱拡散 など) で
達成される分離が本質的に存在比に関係付けられるから

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= \frac{R'}{R} = \frac{\frac{x'}{1-x'}}{\frac{x}{1-x}} \\ \beta &= \frac{R}{R''} = \frac{\frac{x}{1-x}}{\frac{x''}{1-x''}} \end{aligned} \right\}$$

分離係数とカットとの関係

濃縮 $x' = \frac{\alpha x}{1 + (\alpha - 1)x}$,

減損 $x'' = \frac{x}{\beta - (\beta - 1)x}$

$x = \theta x' + (1 - \theta)x''$ に代入

$$\theta = \frac{\beta - 1}{\alpha\beta - 1} [1 + (\alpha - 1)x]$$

カット θ の式に注目成分濃度が含まれる

存在比表示

$$\begin{aligned}\theta &= \frac{\beta - 1}{\alpha\beta - 1} [1 + (\alpha - 1)x] \\ &= \frac{\beta - 1}{\alpha\beta - 1} + \frac{(\alpha - 1)(\beta - 1)}{\alpha\beta - 1} x,\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\bar{\theta} = 1 - \theta &= \frac{\alpha - 1}{\alpha\beta - 1} [\beta - (\beta - 1)x] \\ &= \frac{\beta(\alpha - 1)}{\alpha\beta - 1} - \frac{(\alpha - 1)(\beta - 1)}{\alpha\beta - 1} x\end{aligned}$$

Manhattan Project の際、用いられた

カスケード方程式②

濃縮部(製品流から計算) 蒸留塔の計算法と同じ 回収部(廃棄流から計算)

$$\begin{aligned}\theta_i L_i &= (1 - \theta_{i+1}) L_{i+1} + P \\ \theta_i L_i x'_i &= (1 - \theta_{i+1}) L_{i+1} x''_{i+1} + P x_P\end{aligned}$$

供給段でつなぐ

$$\begin{aligned}\theta_j L_j &= (1 - \theta_{j+1}) L_{j+1} - W \\ \theta_j L_j x'_j &= (1 - \theta_{j+1}) x''_{j+1} - W x_W\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}x' &= \frac{\alpha x}{1 + (\alpha - 1)x}, \\ x'' &= \frac{x}{\beta - (\beta - 1)x}\end{aligned}$$

$$\theta = \frac{\beta - 1}{\alpha\beta - 1} [1 + (\alpha - 1)x]$$

分離係数とカットとの関係を代入して

混合流量 L ,

注目成分モル分率 x

の関数とする.

L が与えられれば x のみの関数.
そうでなければ 2変数 の複雑な式

カスケード方程式③

濃縮部の注目成分濃度を支配する微分方程式

$$\frac{dx}{ds} = 2\varepsilon x(1-x) - \frac{P}{L''}(x_P - x)$$

回収部の注目成分濃度を支配する微分方程式

$$\frac{dx}{ds} = 2\varepsilon x(1-x) - \frac{W}{L'}(x - x_W)$$

Manhattan Project で使用された式 $(\varepsilon = \alpha - 1)$

ガス拡散プラントでは拡散筒
各段流量は同一

混合物流量, 注目成分流量を支配する微分方程式

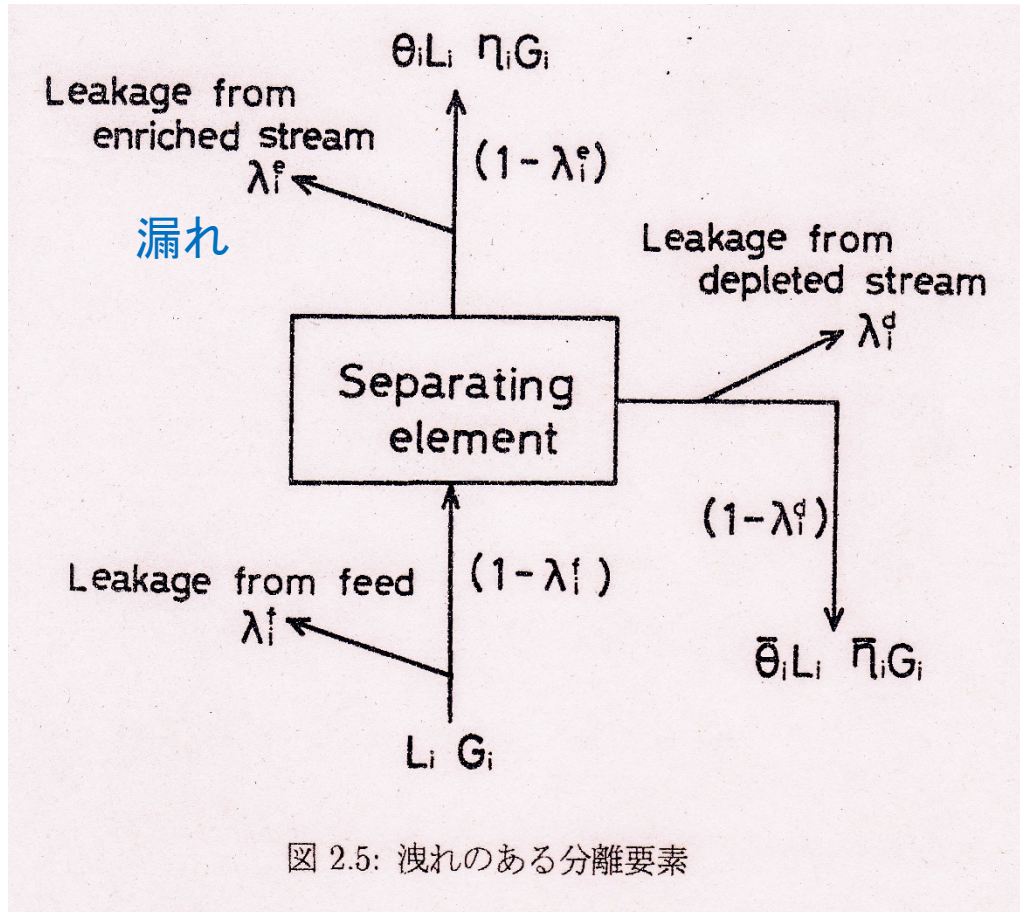
$$\begin{aligned} -\frac{1}{2} \cdot \frac{d^2}{dx^2} L - \frac{d}{dx} [(1-2\theta)L] &= \delta(x-x_0)F \\ -\frac{1}{2} \cdot \frac{d^2}{dx^2} G - \frac{d}{dx} [(-1+2\theta+4\varepsilon\theta\bar{\theta})G] &= \delta(x-x_0)x_F F, \\ &\text{この係数は近似式} \\ \varepsilon &\equiv \alpha\beta - 1 \end{aligned}$$

遠心分離機で構成された
プラントに対応した式

Kawai *et al.* (1973)

2成分混合流量と注目成分流量を区別

注目成分(or非注目成分)に関するカット



注目成分 式中に注目成分濃度は含まれない

$$\left. \begin{aligned} \eta &= \frac{\alpha(\beta - 1)}{\alpha\beta - 1} (1 - \lambda^f)(1 - \lambda^e), \\ \bar{\eta} &= \frac{\alpha - 1}{\alpha\beta - 1} (1 - \lambda^f)(1 - \lambda^d) \end{aligned} \right\}$$

非注目成分 式中に注目成分濃度は含まれない

$$\left. \begin{aligned} \zeta &= \frac{\beta - 1}{\alpha\beta - 1} (1 - \lambda^f)(1 - \lambda^e), \\ \bar{\zeta} &= \frac{\beta(\alpha - 1)}{\alpha\beta - 1} (1 - \lambda^f)(1 - \lambda^d) \end{aligned} \right\}$$

注目成分のカットの近似なし表現を求める際に

「濃縮流中の注目成分流量と
減損流中の注目成分流量の和が
供給流中の注目成分量に等しい」

との関係が,「どんな注目成分の濃度 X に対しても成立する」

ことを利用して,「 X の係数と X ゼロ次の係数をゼロ」とおいて
連立方程式を導き,それを解くことで解を得た.

解がわかってみると,
中学生でもできる関係式の代入のみで
得られることがわかった.

カスケード方程式 (非線形の式を成分数の線形式に分解)

段間流量収支式

$$L_i = \theta_{i-1} L_{i-1} + \bar{\theta}_{i+1} L_{i+1} + \delta_{if} F,$$

ある段への供給流 = 下段からの濃縮流 + 上段からの減損流



$$\begin{aligned} L_i &= L'_{i-1} + L''_{i+1} + \delta_{if} F, \\ G_i &= G'_{i-1} + G''_{i+1} + \delta_{if} x_F F \end{aligned}$$



多成分系への拡張

$$\left. \begin{aligned} (G_j)_i &= (\eta_j)_{i-m} (G_j)_{i-m} + (\bar{\eta}_j)_{i+n} (G_j)_{i+n} + \delta_{if} (G_j)_F \\ &\quad (j = 1, 2, \dots, k-1) \\ (G_k)_i &= (\zeta)_{i-m} (G_k)_{i-m} + (\bar{\zeta})_{i+n} (G_k)_{i+n} + \delta_{if} (G_k)_F \end{aligned} \right\}$$

成分の数の
線型方程式を
解くだけ。

計算時間大幅短縮

混合物流量の式の係数カット θ は分離係数と供給流中の注目成分濃度 x の関数。

x がわからないと、係数カット θ は決められない。
(非線形: 繰り返し計算が必要)

混合物流量のカスケード方程式と同じ形の注目成分流量の式が得られる。

非注目成分に対しても同形の式が得られる。
各成分流量の係数は分離係数のみの関数
(線形: 繰り返し計算不要)

いくら分離係数が大きくなっても 分離係数には上限値がある

注目成分、非注目成分に関するカット
と
分離係数との関係

$$\alpha = \eta / \zeta$$

$$\beta = \bar{\zeta} / \bar{\eta}$$

x_F	$x_F \simeq 0$	$x_F < \theta$	$x_F > \theta$	$x_F \simeq 1$
α	$\alpha\theta < 1$	$\alpha < \frac{1-x_F}{\theta-x_F}$	unlimited	unlimited
β	unlimited	unlimited	$\beta < \frac{x_F}{x_F - \theta}$	$\beta(1-\theta) < 1$

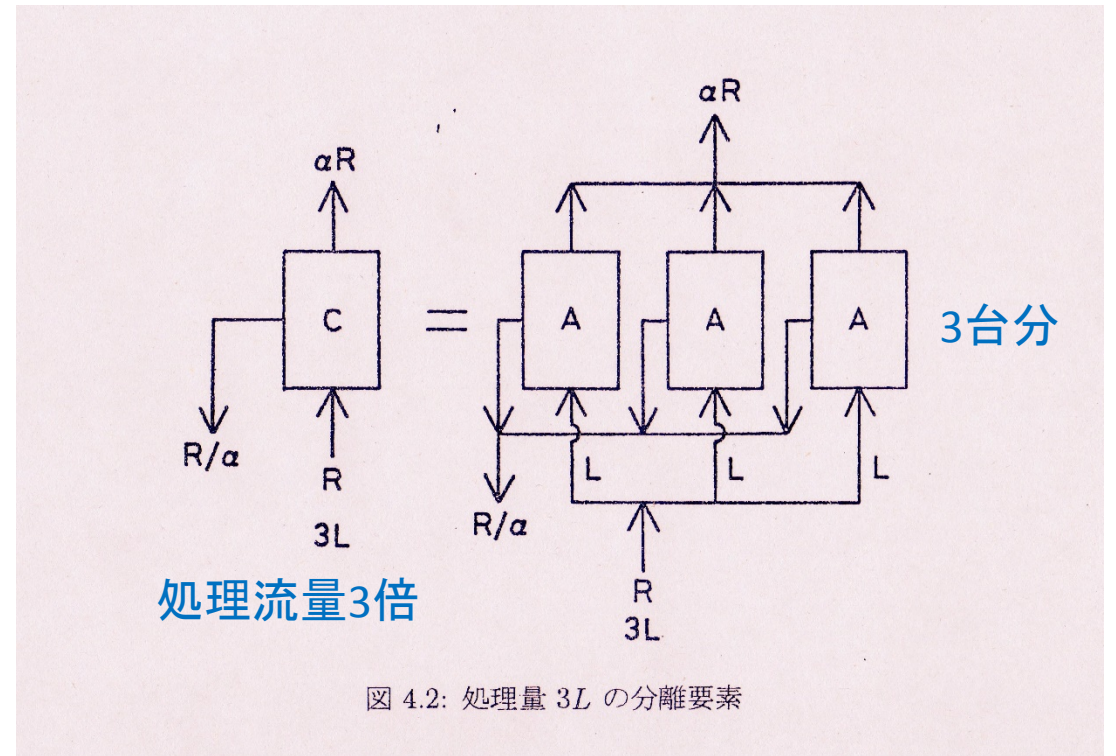
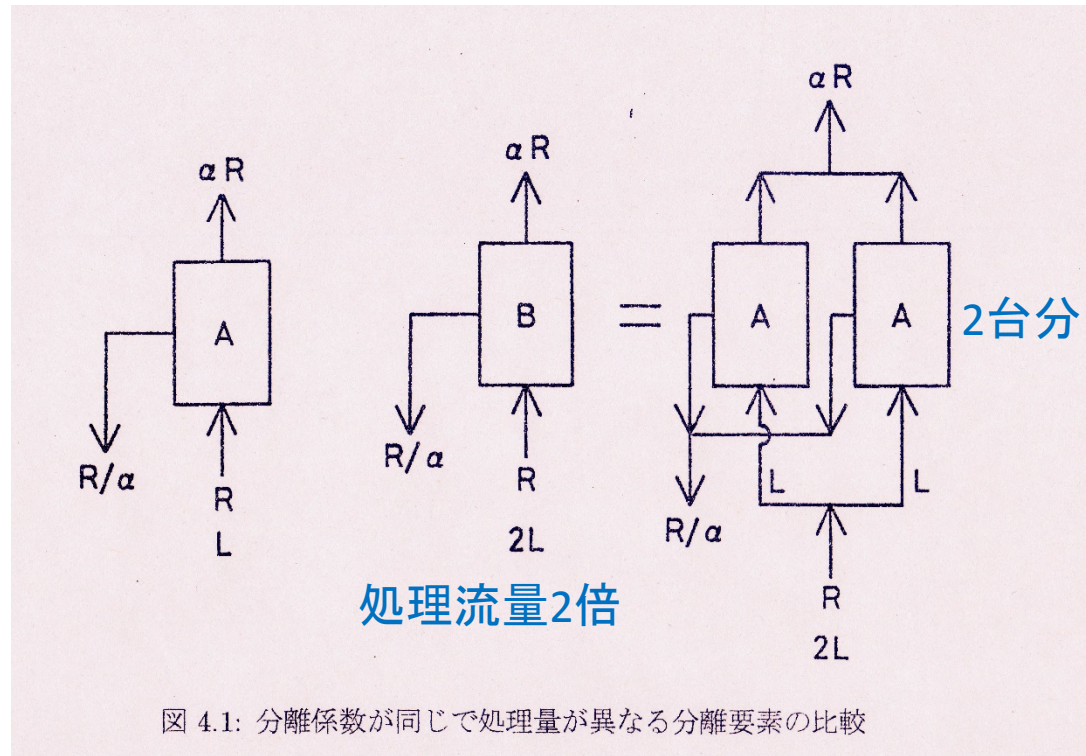
供給流中の注目成分濃度が小さければ(これが一般的)

濃縮側分離係数 α とカット θ の積 $\alpha\theta$ は決して1を超えない。

分離パワー研究の歴史

- K.Cohen^{*}: “The Theory of Isotope Separation as Applied to Large Scale Production of U-235”, (1951) (* 元 米国化学工学会会長)
Manhattan Project の一部, 同位体分離の部分をもとめたもの
- 分離作業量の概念: H.C.Urey (1939) 重水素の発見(1932)でノーベル化学賞
- 価値関数 の概念: R.Peierls 固体物理パイエルスポテンシャルの発見
- 価値関数概念をエレガントに説明: P.A.M.Dirac 1933年ノーベル物理学賞

分離パワーは処理流量に比例する



分離係数と分離パワーとの関係は？

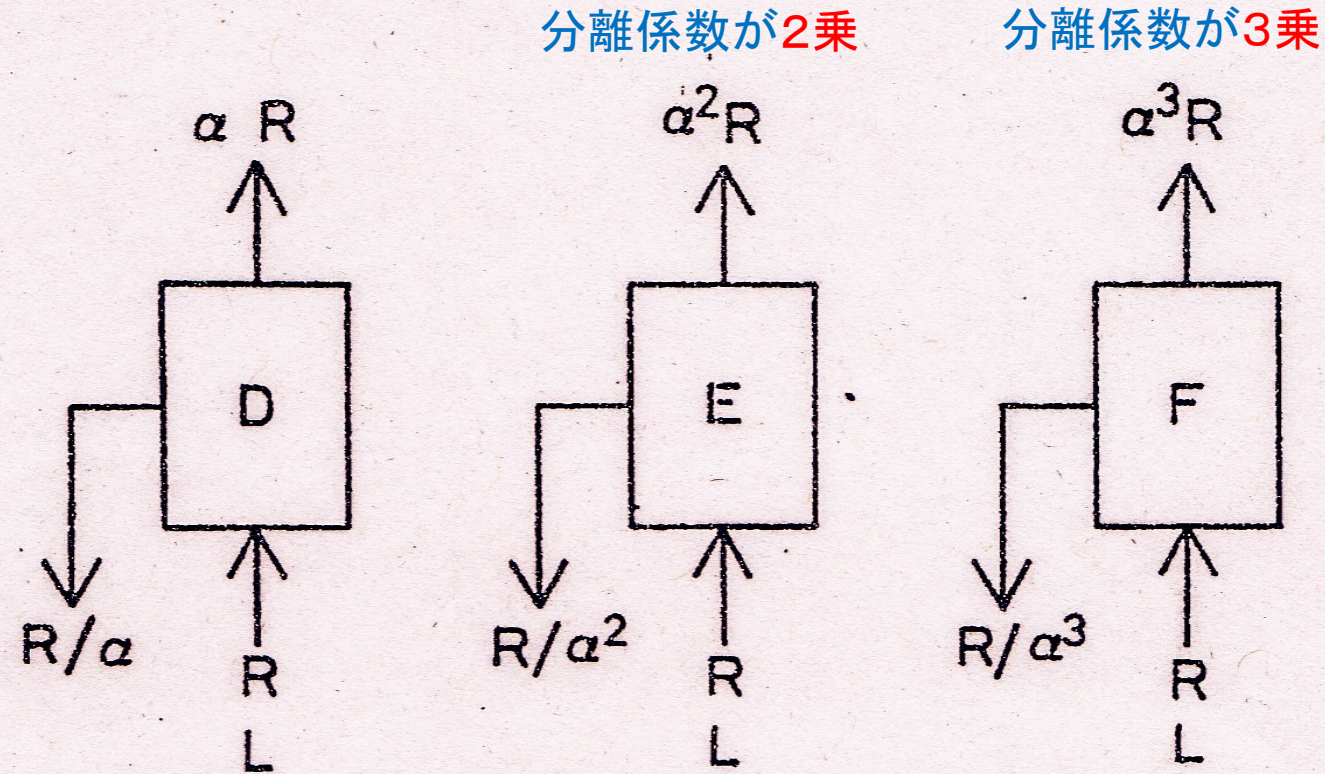


図 4.3: 処理量が同じで分離係数が異なる分離要素

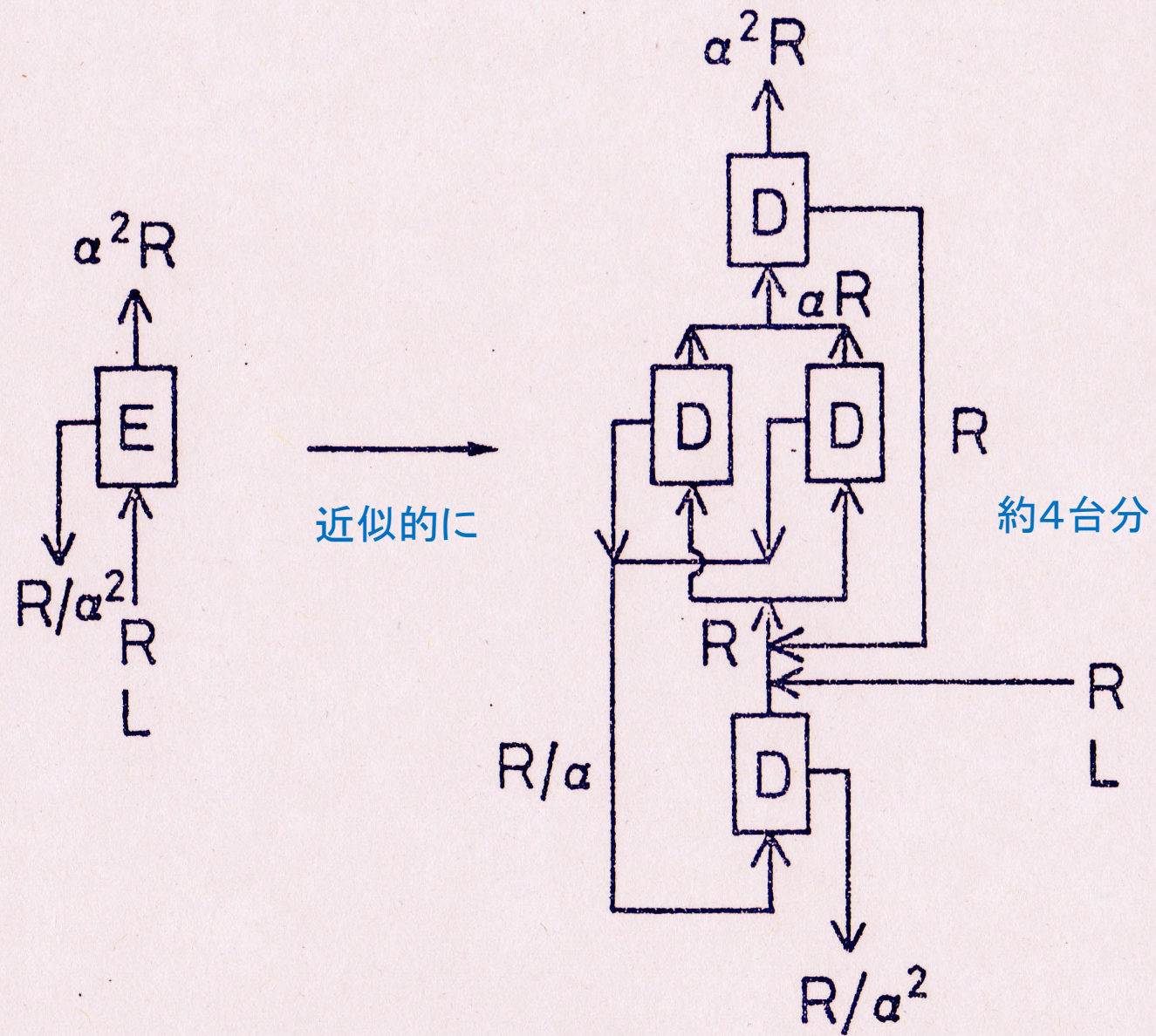


図 4.4: 分離係数が α^2 の分離要素

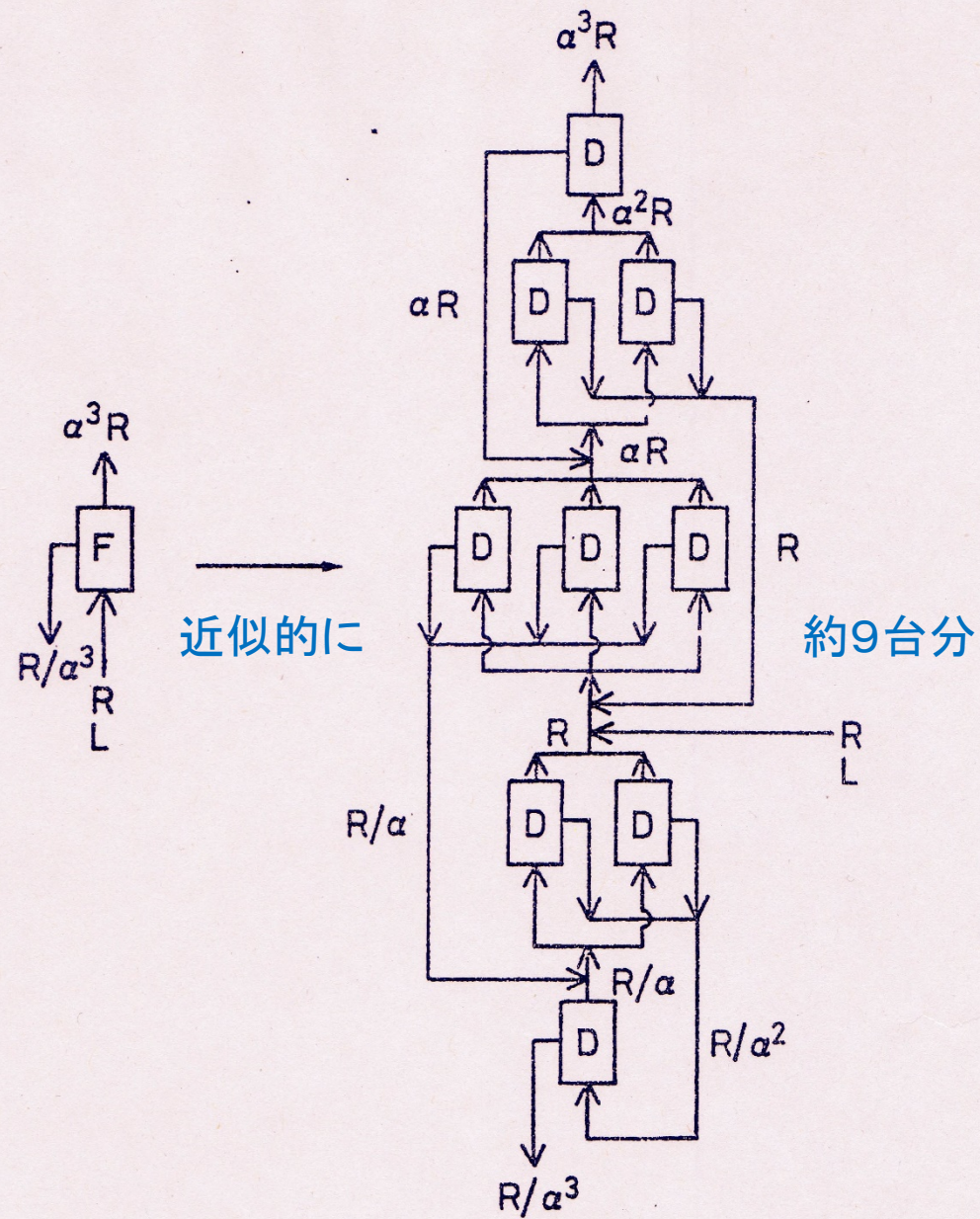


図 4.5: 分離係数が α^3 の分離要素

分離パワーに対する P.A.M.Dirac の考え方①

混合物の**価値**を考える

$$U(L, x) = L \cdot V(x)$$

分離要素の仕事は、
要素通過前後の**価値の差し引き**

$$\begin{aligned}\delta U &= U(L', x') + U(L'', x'') - U(L, x) \\ &= L[\theta V(x') + (1 - \theta)V(x'') - V(x)]\end{aligned}$$

濃縮，減損の程度が小さければ，
Taylor展開可能（**極微小分離過程**）

$$\begin{aligned}\delta U &= V(x)[\theta L + (1 - \theta)L - L] \leftarrow \text{物質収支で消える} \\ &+ \frac{dV(x)}{dx}[\theta L(x' - x) + (1 - \theta)L(x'' - x)] \\ &+ \frac{d^2V(x)}{dx^2} \left[\theta L \frac{(x' - x)^2}{2} + (1 - \theta)L \cdot \frac{(x'' - x)^2}{2} \right] \\ &+ \dots\end{aligned}$$

残るのは2階微分の項

より高次の項は微小なのでゼロとおく

分離パワーに対する P.A.M.Dirac の考え方②

整理すると

$$\begin{aligned}\delta U &= \frac{d^2 V(x)}{dx^2} \left[\theta L \frac{\varepsilon_h^2}{2} x^2 (1-x^2) + (1-\theta) L \frac{\theta^2}{(1-\theta)^2} \frac{\varepsilon_h^2}{2} x^2 (1-x)^2 \right] \\ &= \frac{\theta}{1-\theta} \frac{L \varepsilon_h^2}{2} \cdot \frac{d^2 V(x)}{dx^2} [x(1-x)]^2\end{aligned}$$

分離の仕事は供給濃度に依存してはいけない(価値関数の導出)

$$\frac{d^2 V(x)}{dx^2} = \frac{1}{[x(1-x)]^2}$$

→

$$V(x) = (2x-1) \ln R = (2x-1) \ln \frac{x}{1-x}$$

対称分離要素の分離パワー

対称

symmetric

$$\alpha = \beta$$

非対称

asymmetric

$$\alpha \neq \beta$$

$$\begin{aligned}\frac{\delta U}{L} &= \theta V(R') + (1 - \theta)V(R'') - V(R) \\ &= (R \text{ によらない関数}) = \varphi(\alpha)\end{aligned}$$

解くべき関数方程式: 実は漸化式(大学入試レベル)に変形して容易に解ける

$$\varphi = \frac{1}{\alpha + 1} \cdot \frac{1 + \alpha R}{1 + R} V(\alpha R) + \frac{\alpha}{\alpha + 1} \cdot \frac{1 + R/\alpha}{1 + R} V(R/\alpha) - V(R)$$

対称分離要素の分離パワー②

$$V(R) = \varphi \cdot \frac{\alpha + 1}{\alpha - 1} \cdot \frac{1}{\ln \alpha} \cdot \frac{R - 1}{R + 1} \ln R$$

$$\varphi = \frac{\alpha - 1}{\alpha + 1} \ln \alpha$$

価値関数

$$V(R) = \frac{R - 1}{R + 1} \ln R = (2x - 1) \ln \frac{x}{1 - x}$$

対称分離の分離パワー

$$\delta U = L \cdot \frac{\alpha - 1}{\alpha + 1} \ln \alpha$$

極微小分離ならば

$$\delta U = \frac{\varepsilon^2}{2} L$$

非対称分離要素の分離パワー①

非対称分離プロセスの価値関数 $V(R)$ は次の関数方程式

$$\begin{aligned}\frac{\delta U}{L} &= \varphi(\alpha, \beta) \\ &= \theta V(\alpha R) + (1 - \theta)V(R/\beta) - V(R) \\ &= \frac{\beta - 1}{\alpha\beta - 1} \cdot \frac{1 + \alpha R}{1 + R} V(\alpha R) + \frac{\beta(\alpha - 1)}{\alpha\beta - 1} \left(\frac{1 + R/\beta}{1 + R} \right) V(R/\beta) - V(R)\end{aligned}$$

を満足しなければならない。ここで $\varphi(\alpha, \beta)$ は単位流量あたりの分離パワーである。

この解は1960年、遠心分離機開発に携わっていたボン大学の研究者達(W.Bulang, W.Groth *et al.*)によって示された。脚注によれば、解いたのは同大学機械数学研究所のP.Muller。しかし、解法は示されていない。

非対称分離要素の分離パワー②

これを解いてみたら
一般解は

$$V(R) = \frac{A + BR}{1 + R} + \varphi(\alpha, \beta) \frac{bR - a}{1 + R} \ln R$$

この関数形は
何でもOK!!!

ただし, A, B は任意定数であり, a, b は

α と β とを入れ替えた式

$$\frac{1}{a} = \frac{\beta(\alpha - 1) \ln \beta - (\beta - 1) \ln \alpha}{\alpha\beta - 1}$$

Bulang, Groth *et al.*の
従来の非対称分離パワー

$$\frac{1}{b} = \frac{\alpha(\beta - 1) \ln \alpha - (\alpha - 1) \ln \beta}{\alpha\beta - 1}$$

価値関数を支配する関数方程式を解くだけでは
分離パワーの関数形を決めることは不可能

どちらの式が適切か? 1977年掲載
(金川, 山本の実用的解決法)

価値関数一般式

$$\left. \begin{aligned} V(R) &= \varphi(\alpha, \beta) \frac{bR - a}{R + 1} \ln R \\ \frac{1}{a} &= \frac{\beta(\alpha - 1) \ln \beta - (\beta - 1) \ln \alpha}{\alpha\beta - 1} \\ \frac{1}{b} &= \frac{\alpha(\beta - 1) \ln \alpha - (\alpha - 1) \ln \beta}{\alpha\beta - 1} \end{aligned} \right\}$$

価値関数の式の中に分離係数が含まれている

価値関数の式の中に分離係数が含まれている ことによって生じる不都合

- カスケードの分離パワーが構成要素の**分離係数に依存**する.
- 分離係数が異なる多種類の分離要素で構成されるカスケードの分離パワーを計算する時, 分離係数依存項を決めることは困難.
- **実用的に解決した**にしても, カスケードの供給流, 濃縮流, 減損流のモル分率条件で分離パワーの関数形が異なる.
- カスケードは巨視的に見れば**一つの非対称分離要素**. したがってカスケード全体の濃縮側分離係数と減損側分離係数で分離パワーが計算できるはず. しかし, どちらの関数形を用いても, **価値関数から計算した分離パワーの値と一致しない**.

非対称分離パワーに内在する 矛盾の原因を解明 (1977年掲載)

$$\begin{aligned}\delta U_b &= G'_b V_b(\alpha R) + G''_b V_b(R/\beta) - G_b V_b(R) \\ &= G_b [\eta V_b(\alpha R) + \bar{\eta} V_b(R/\beta) - V_b(R)] \\ &= G_b \varphi_b(\alpha, \beta) \quad \text{注目成分}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\delta U_a &= G'_a V_a(\alpha R) + G''_a V_a(R/\beta) - G_a V_a(R) \\ &= G_a [\zeta V_a(\alpha R) + \bar{\zeta} V_a(R/\beta) - V_a(R)] \\ &= G_a \varphi_a(\alpha, \beta) \quad \text{非注目成分}\end{aligned}$$



$$\begin{aligned}\varphi_b(\alpha, \beta) &= \eta V_b(\alpha R) + \bar{\eta} V_b(R/\beta) - V_b(R) \\ \varphi_a(\alpha, \beta) &= \zeta V_a(\alpha R) + \bar{\zeta} V_a(R/\beta) - V_a(R)\end{aligned}$$

価値関数 $V_b(R) = \ln R$
(分離係数を含まず)

$V_a(R) = -\ln R$

今まで提案されてきた関数形は、それぞれ
注目成分, 非注目成分に関する分離パワーである！

$$\begin{aligned}\varphi_b(\alpha, \beta) &= \frac{\alpha(\beta-1)\ln\alpha - (\alpha-1)\ln\beta}{\alpha\beta-1} = \frac{1}{\beta} \\ \varphi_a(\alpha, \beta) &= \frac{\beta(\alpha-1)\ln\beta - (\beta-1)\ln\alpha}{\alpha\beta-1} = \frac{1}{\alpha}\end{aligned}$$

P.A.M.Dirac 等が
分離パワーに対して要請した条件は、
ウラン235 と 238 の流量合計では満足されず、
成分ごとに満足される。

カスケード全体の分離パワーと単位流量当たりの注目成分, 非注目成分に関する分離パワーとの関係

$$\delta U = \varphi(\alpha, \beta)L$$

$$= \varphi(\alpha, \beta)[G_b + G_a]$$

$$= \varphi(\alpha, \beta) \left[\frac{\delta U_b}{\varphi_b(\alpha, \beta)} + \frac{\delta U_a}{\varphi_a(\alpha, \beta)} \right]$$

aとbのどちらを選ぶか?

注目成分と
非注目成分の
個性を消している

$$V(R) = \varphi(\alpha, \beta) \left[\frac{R}{1+R} \cdot \frac{\ln R}{\varphi_b(\alpha, \beta)} + \frac{1}{1+R} \cdot \frac{-\ln R}{\varphi_a(\alpha, \beta)} \right]$$

$$V(R) = \varphi(\alpha, \beta) \cdot \frac{bR - a}{1+R} \ln R$$

$$\left. \begin{aligned} G_b &= xL = \frac{R}{1+R}L \\ G_a &= (1-x)L = \frac{1}{1+R}L \end{aligned} \right\}$$

非対称価値関数で計算した分離パワー

$$\delta U_T = F \cdot \varphi(\alpha, \beta) \left[x_F \frac{\varphi_b(\alpha_T, \beta_T)}{\varphi_b(\alpha, \beta)} + (1-x_F) \frac{\varphi_a(\alpha_T, \beta_T)}{\varphi_a(\alpha, \beta)} \right]$$

$$= \varphi(\alpha, \beta) \left[\frac{(\delta U_b)_T}{\varphi_b(\alpha, \beta)} + \frac{(\delta U_a)_T}{\varphi_a(\alpha, \beta)} \right]$$

(通常の意味の)分離パワーと 成分毎の分離パワーとの関係

微小分離, 対称分離に対する
(通常の意味での) 価値関数

$$V(x) = (2x - 1) \ln R = (2x - 1) \ln \frac{x}{1 - x}$$

$$\delta U_{sym} = L \left[\frac{R}{R+1} \varphi_b(\alpha, \beta) + \frac{1}{R+1} \varphi_a(\alpha, \beta) \right]$$

$$= G_b \varphi_b(\alpha, \beta) + G_a \varphi_a(\alpha, \beta)$$

$$= \delta U_b + \delta U_a \quad \text{単なる線形和}$$

従来計算されていた
分離パワーの
新しい意味づけ

(全分離係数の値がカットによらず一定との近似で)
分離パワーを最大にするカット

$$\delta U \simeq F\varphi_a(\alpha, \beta) = F \cdot \ln \frac{\theta(\alpha\beta - 1) + 1}{(\alpha\beta)^\theta}$$

$$\begin{aligned} 0 &= \frac{d(\delta U/F)}{d\theta} = \frac{d\varphi_a}{d\theta} && \text{カットで微分して} \\ &&& \text{ゼロとおく} \\ &= \frac{(\alpha\beta)^\theta}{\theta(\alpha\beta - 1) + 1} \cdot \frac{d}{d\theta} \left[\frac{\theta(\alpha\beta - 1) + 1}{(\alpha\beta)^\theta} \right] \\ &= \frac{\alpha\beta - 1}{\theta(\alpha\beta - 1) + 1} - \ln(\alpha\beta). \end{aligned}$$

最適カット

$$\theta_{opt}^{x_F \simeq 0} = \frac{1}{\ln(\alpha\beta)} - \frac{1}{\alpha\beta - 1}$$

表 4.1: $\alpha\beta$ の大きさと $x_F \ll 1$ の最適カットとの関係

$\alpha\beta$	θ_{opt}	α^{opt}	β^{opt}	φ_a^{opt}
1.1	0.492	1.0484	1.0492	1.135E-3
1.5	0.466	1.2164	1.2331	0.0205
2.0	0.443	1.3863	1.4427	0.0597
5.0	0.371	2.0118	2.4853	0.3128
10	0.323	2.5584	3.9087	0.6190
10^2	0.207	4.6517	21.4976	2.1145
10^3	0.144	6.9147	144.620	3.9810
10^4	0.108	9.2113	1,085.63	5.9908
10^5	0.0868	11.513	8,685.8	8.0696
10^6	0.0724	13.816	72,382.3	10.1897

分離係数が大きくなるほど最適カットが減少

多成分分離理論①

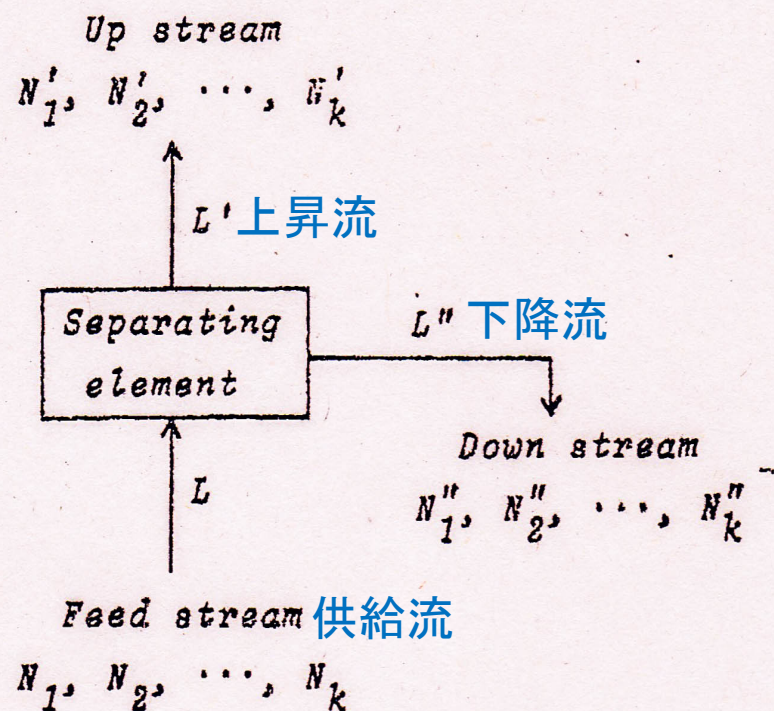


図 6.1: 多成分分離要素

$$L = \sum_{j=1}^k G_j, \quad L' = \sum_{j=1}^k G'_j, \quad L'' = \sum_{j=1}^k G''_j$$

モル分率 x_j は

$$x_j = G_j / L \quad (j = 1, 2, \dots, k)$$

上昇流, 下降流との間に物質収支の関係

$$G_j = G'_j + G''_j \quad (j = 1, 2, \dots, k)$$

$$L = L' + L''$$

多成分分離理論②

$$R_j \equiv G_j/G_k \quad \text{分母にくる成分を基準成分と呼ぶ}$$

$$= x_j/x_k \quad (j = 1, 2, \dots, k-1)$$

$$\theta = L'/L, \quad \bar{\theta} = L''/L$$

上昇流, 下降流への存在比の変化を分離係数

$$\alpha_j \equiv R'_j/R_j$$

$$\beta_j \equiv R_j/R''_j \quad (j = 1, 2, \dots, k-1)$$

また, 各成分に関するカットを基準成分を除いて

$$\eta_j \equiv G'_j/G_j, \quad \bar{\eta}_j \equiv G''_j/G_j \quad (j = 1, 2, \dots, k-1)$$

↓

と定義し, 基準成分に関しては,

$$L = G_k \left[1 + \sum_{j=1}^{k-1} R_j \right]$$

$$L' = G'_k \left[1 + \sum_{j=1}^{k-1} \alpha_j R_j \right]$$

$$L'' = G''_k \left[1 + \sum_{j=1}^{k-1} R_j / \beta_j \right]$$

$$\zeta \equiv G'_k/G_k, \quad \bar{\zeta} \equiv G''_k/G_k$$

↓
G_k

多成分分離理論③

$$\sum_{j=1}^{k-1} (G_k - \alpha_j G'_k - G''_k / \beta_j) R_j = 0$$

どんな R に対しても成立: R の係数はゼロ

初めて注目成分に関するカットを導出した時の技法

多成分分離要素の分離係数に課せられる条件

$$\zeta \equiv \frac{G'_k}{G_k} = \frac{\beta_j - 1}{\alpha_j \beta_j - 1} = (j \text{ の値によらない}) \quad (j = 1, 2, \dots, k-1)$$

全分離係数 $\alpha\beta$ を勝手に α , β に分割できない

多成分分離カスケード方程式

第 i 段の成分ごとの流量バランス式

$$\left. \begin{aligned} (G_j)_i &= (\eta_j)_{i-m}(G_j)_{i-m} + (\bar{\eta}_j)_{i+n}(G_j)_{i+n} + \delta_{if}(G_j)_F \\ &\quad (j = 1, 2, \dots, k-1) \\ (G_k)_i &= (\zeta)_{i-m}(G_k)_{i-m} + (\bar{\zeta})_{i+n}(G_k)_{i+n} + \delta_{if}(G_k)_F \end{aligned} \right\}$$

複雑な非線型方程式を成分の数の線型方程式群に分解



計算時間を桁違いに短縮

多成分分離パワーを支配する式の解を導出①

$$\varphi = \theta V(\overrightarrow{\alpha R}) + \bar{\theta} V(\overrightarrow{R/\beta}) - V(\vec{R}) ,$$

この式を満足する V の関数形は？

$$\left. \begin{aligned} \overrightarrow{\alpha R} &= (\alpha_1 R_1, \alpha_2 R_2, \dots, \alpha_{k-1} R_{k-1}) \\ \overrightarrow{R/\beta} &= (R_1/\beta_1, R_2/\beta_2, \dots, R_{k-1}/\beta_{k-1}) \\ \vec{R} &= (R_1, R_2, \dots, R_{k-1}) \end{aligned} \right\}$$

多成分分離パワーを支配する式の解を導出②

各成分

$$\left. \begin{aligned} \delta U_j &= G_j \varphi_j(\alpha_j, \beta_j) \\ &= G_j [\eta_j V_b(\alpha_j R_j) + \bar{\eta}_j V_b(R_j/\beta_j) - V_b(R_j)] \\ V_b(R) &= \ln R \end{aligned} \right\}$$

基準成分

$$\left. \begin{aligned} (\delta U_k)_j &= G_k \varphi_a(\alpha_j, \beta_j) \\ &= G_k [\zeta V_a(\alpha_j R_j) + \bar{\zeta} V_a(R_j/\beta_j) - V_a(R_j)] \\ V_a(R) &= -\ln R \end{aligned} \right\}$$

ただし

$$\begin{aligned} \varphi_b(\alpha, \beta) &= \varphi_a(\beta, \alpha) \\ &= \frac{\alpha(\beta - 1) \ln \alpha - (\alpha - 1) \ln \beta}{\alpha\beta - 1} \end{aligned}$$

多成分分離パワーを支配する式の解を導出③

2成分

$$\begin{aligned}\delta U &= \varphi(\alpha, \beta) \cdot L = \varphi(\alpha, \beta)[G_b + G_a] \\ &= \varphi(\alpha, \beta) \left[\frac{\delta U_b}{\varphi_b(\alpha, \beta)} + \frac{\delta U_a}{\varphi_a(\alpha, \beta)} \right]\end{aligned}$$

類推

多成分

$$\delta U = \varphi \sum_{l=1}^{k-1} \left[\frac{\delta U_l}{\varphi_b(\alpha_l, \beta_l)} + C_l \frac{(\delta U_k)_l}{\varphi_a(\alpha_l, \beta_l)} \right]$$

2成分系からの拡張で
多成分系の解を類推。
確かに関数方程式を満足

$$V(\vec{R}) = \varphi \sum_{l=1}^{k-1} W_l(R_l),$$

$$W_l(R_l) = \left[\frac{1}{\varphi_b(\alpha_l, \beta_l)} \cdot \frac{R_l}{1 + \sum_{j=1}^{k-1} R_j} - \frac{C_l}{\varphi_a(\alpha_l, \beta_l)} \cdot \frac{1}{1 + \sum_{j=1}^{k-1} R_j} \right] \ln R_l$$

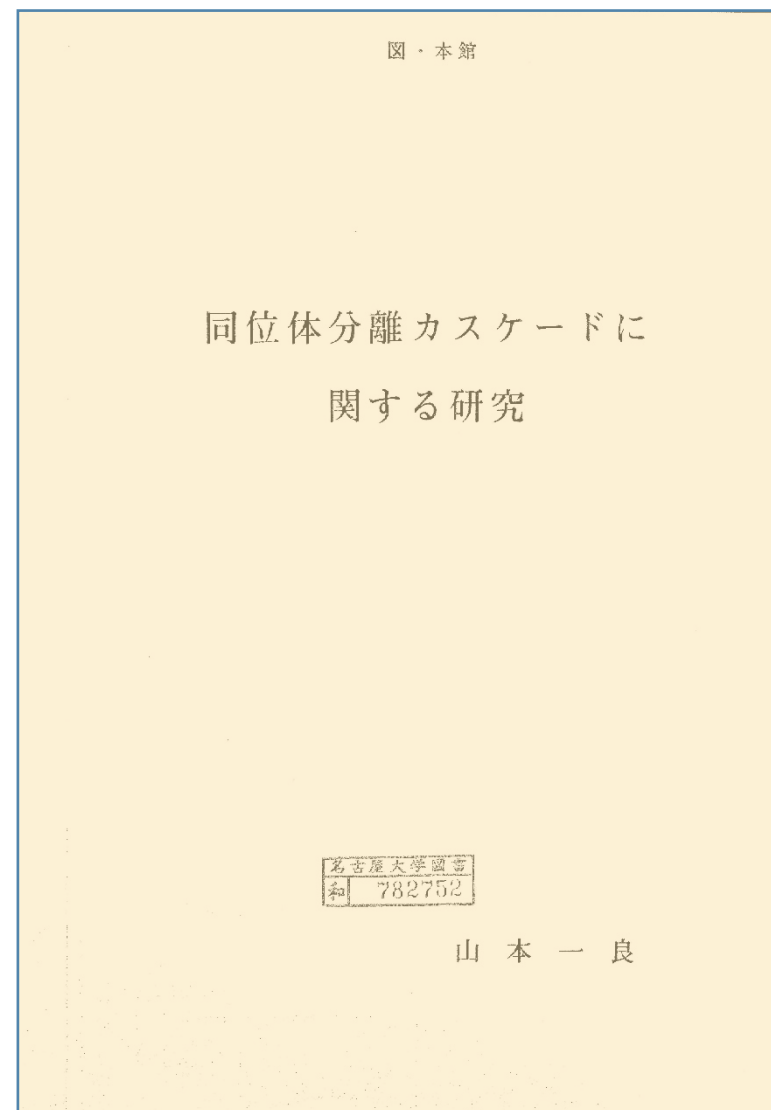
モル分率表記

$$V(\vec{x}) = \varphi \sum_{l=1}^{k-1} W_l \left(\frac{x_l}{x_k} \right),$$

$$W_l \left(\frac{x_l}{x_k} \right) = \left[\frac{x_l}{\varphi_b(\alpha_l, \beta_l)} - \frac{C_l x_k}{\varphi_a(\alpha_l, \beta_l)} \right] \ln \frac{x_l}{x_k}$$

同位体分離カスケードに関する研究

- 名古屋大学リポジトリ
- <http://hdl.handle.net/2237/6560>
- 日本原燃(株)等,
高性能遠心分離機で構成される
ウラン濃縮カスケード設計の現場で
教科書として用いられた



目次

1 序論

2 分離要素

2.1 基礎的事項

2.1.1 分離要素の概念

2.1.2 注目の点

同位体分離カスケード理論

2.2.1 “任意成分に関するカット”の概念

2.2.2 分離係数との関係

2.2.3 数値的適合の扱い

2.2.4 カットが決まっている

2.2.5 カットの濃度依存性

2.3 分離係数の上限値

2.3.1 分離要素

2.3.2 分離係数に対する制限値

3 カスケード理論

3.1 序論

3.1.1 カスケード

3.1.2 カスケード

3.2 カスケード方程式

3.2.1 基礎方程式

3.2.2 濃度の伝達

3.2.3 カスケード

3.2.4 m-up n-down

3.3 各種カスケードの比較

3.3.1 単純型カスケード

3.3.2 方形カスケード

4 分離パワー

4.1 序論

4.1.1 分離パワーの概念

4.1.2 分離パワー研究の歴史

山本 一良

1979



科目名(単位数): 同位体分離(2 単位)

科目区分: 専門科目

授業形態: 講義

対象履修コース: 量子エネルギー

開講時期: 4 年前期

選択/必修: 選択

教官: 山本 一良 教授

教育目標: ウラン濃縮, 核融合炉燃料水素等同位体分離について, 分離法の原理, 分離要素, 分離カスケードの考え方等, その初歩を学ぶ. 特に, 分離係数の定義, 分離評価の概念である分離パワーについて, その科学的基礎, 数学的基礎について習得する.

バックグラウンドになる科目: 移動現象論, 原子力燃料サイクル

授業内容 第1週 なぜ同位体分離が必要か? 同位体の利用とその意義

第2週 個別分離と統計的分離

第3週 分離係数 その1

第4週 分離係数 その2

第5週 分離要素の数学的モデル, カット, 各成分に関するカット

第6週 分離係数の上限値

第7週 カスケードと流量方程式

第8週 分離パワー その1 その考え方と歴史

第9週 分離パワー その2 山本による新概念と数学的基礎

第10週 多成分分離理論

第11週 ウラン濃縮 その1 遠心法

第12週 ウラン濃縮 その2 その他の方法

第13週 水素同位体分離 その1

第14週 水素同位体分離 その2

第15週 期末試験

教科書: 特に指定しない

参考書: 山本 一良 著, 「同位体分離カスケード理論」

希望者には実費で配布する

教育方法に関する工夫: 同位体分離にかかわる諸概念について, なぜ, その概念が用いられるようになったか, なぜ, そのように定義されるのか等, 基本的な考え方を, 旧理論体系に内在する数学的困難を取り除き, 旧理論体系を包含する新理論体系を構築した本人がていねいに説明する.

評価方法: 筆記試験, 出席小テスト, レポート

連絡先: 山本 一良(内線 3783, i-yamamoto@nucl.nagoya-u.ac.jp)

カスケード理論

ウラン濃縮

水素同位体分離

現在、週表記はダメ

Dr. Gernot Zippe (Nov.1917～May 2008)

「非対称分離要素で構成されたカスケードについて
議論するため」

1985年, 東京で開催された

遠心分離ウラン濃縮の国際会議

“Gases in Strong Rotation” に参加した

Dr.G.Zippe に呼び出される.

Dr.G.Zippe: 第2次世界大戦中のドイツで, ウラン濃縮用遠心分離機を開発したリーダー. 敗戦後60名のドイツ人, オーストリア人の科学技術者とともにソ連に抑留され, 引き続き遠心分離機を開発.

Zippe型遠心分離機を開発して帰国. 世界中のウラン濃縮用遠心分離機は, Dr.Zippeの影響を受けている.



1998年10月撮影(名古屋国際会議場にて)



Dr.Zippe

Takashima

I.Yamamoto

Kakihana

Mikami

Kai

Kanagawa

F.Yamamoto

同位体分離研究のための 予備実験装置

熱拡散塔 : 昭和49年4月, 京都大学原子炉実験所(大阪府熊取町)から
金川教授使用の装置を貰い受けることから開始.
希ガス(Ar同位体)分離用.

水蒸留塔 : 核融合燃料サイクルで重要なトリチウム分離をターゲットに開始.

熱拡散塔(熱拡散現象を利用した分離装置)

- 「**熱拡散**」とは、「混合流体を温度勾配下に置くと、一般には、重い成分が低温側に、軽い成分が高温側に移動する現象」のこと。
- 「**熱拡散塔**」は二重円筒で中心軸に熱線を張り外側を冷却する構造で、熱線と冷壁間の温度勾配により一般に冷壁側に重成分を、熱線側に軽成分を分け、温度勾配によって生じた**自然対流で分離を重ね**。塔上部に軽成分、塔下部に重成分を濃縮。**自然対流が本質的**。
- 「熱拡散塔」を用いて、1939年 ドイツの K.Clausius と G.Dickel が塩素同位体分離に成功。**Clausius-Dickel column** と呼ばれる。
- 同年、彼らは6フッ化ウランを用いた**ウラン濃縮**を開始。
- Manhattan Project でも同法を用いて **0.72% の天然ウランから 0.9% 程度の微濃縮**に使用。
- **理研**でも1943年から**ウラン濃縮「二号研究」**開始。1944年7月に高さ5mの熱拡散塔完成。1945年5月に空襲で焼失。
- **Jones-Furry-Onsager** が**軸方向1次元濃度分布解析理論**を完成。

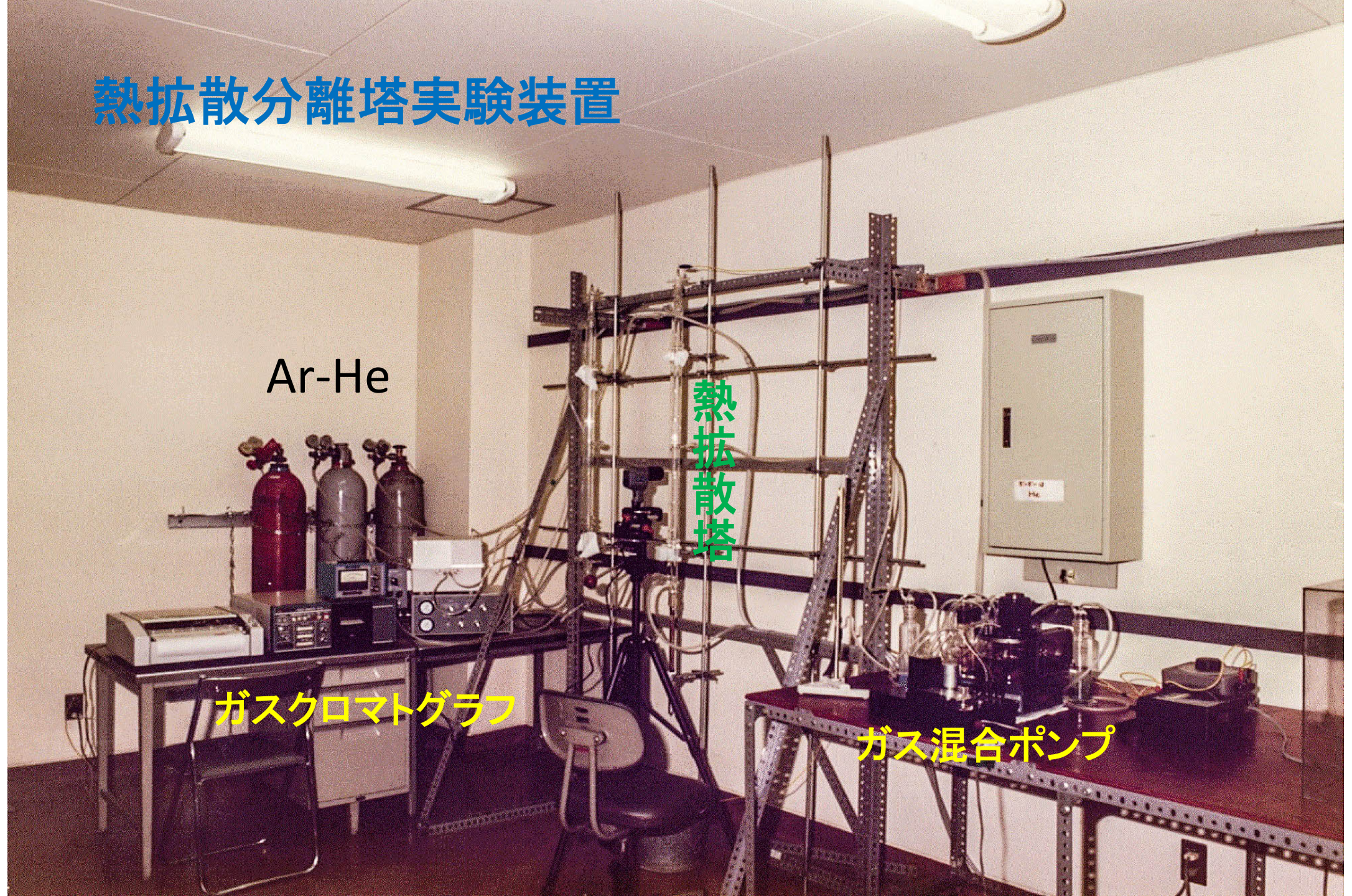
熱拡散分離塔実験装置

Ar-He

熱
拡
散
塔

ガスクロマトグラフ

ガス混合ポンプ



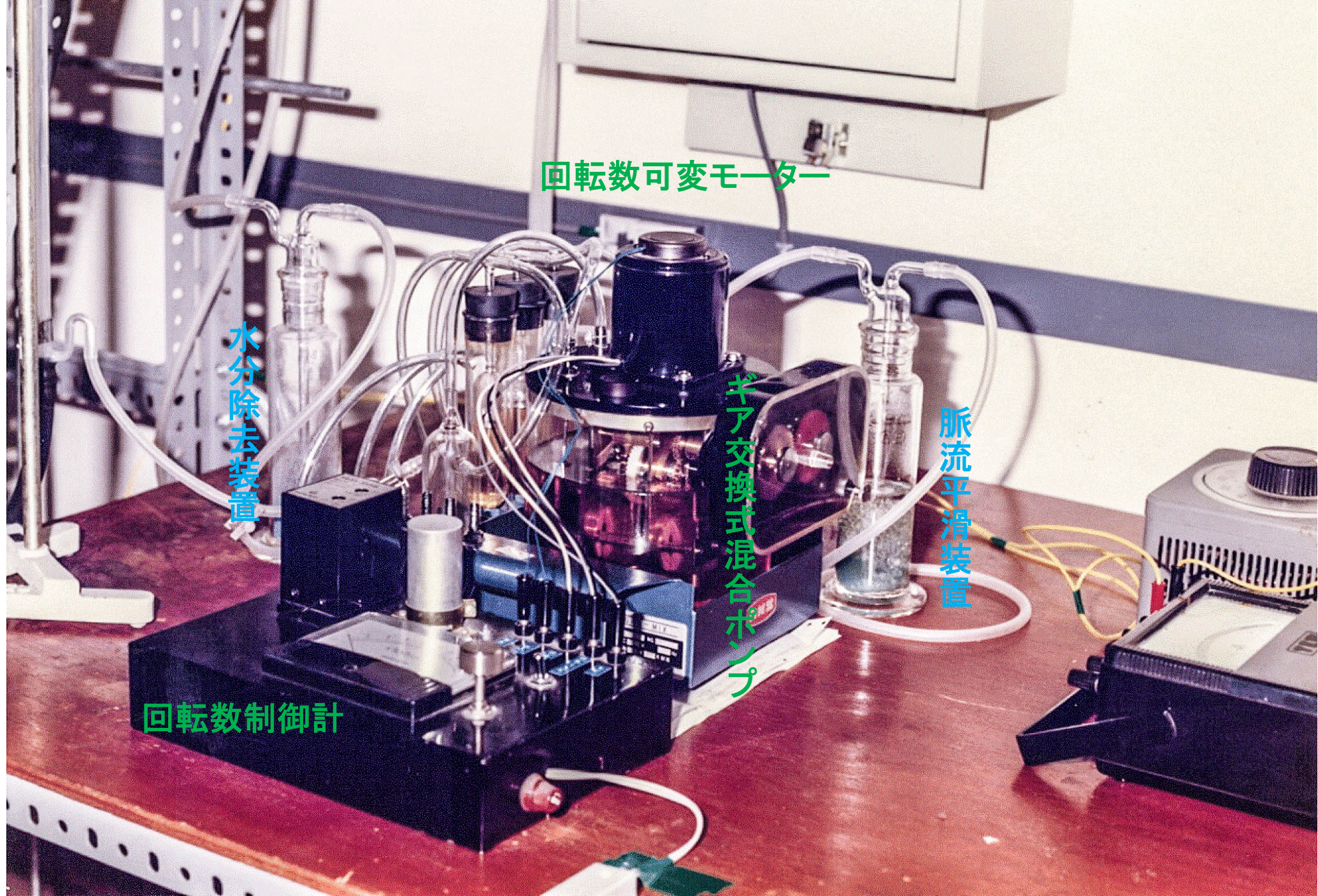
回転数可変モーター

水分除去装置

ギア交換式混合ポンプ

脈流平滑装置

回転数制御計





赤外線放射温度計

Ar と He の混合気体を熱拡散分離すると
重い Ar が塔下部に、軽い He が塔上部に濃縮。

He の熱伝導度は Ar のその約9倍(標準状態)。

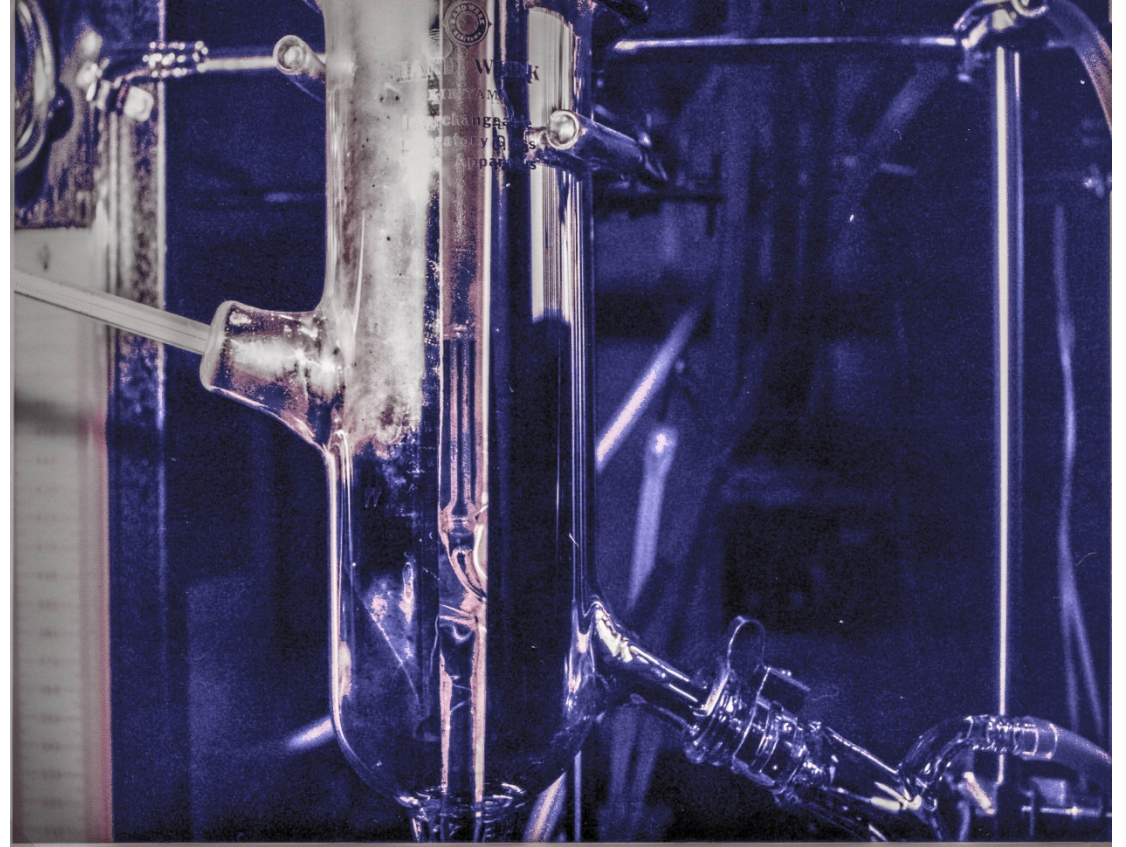
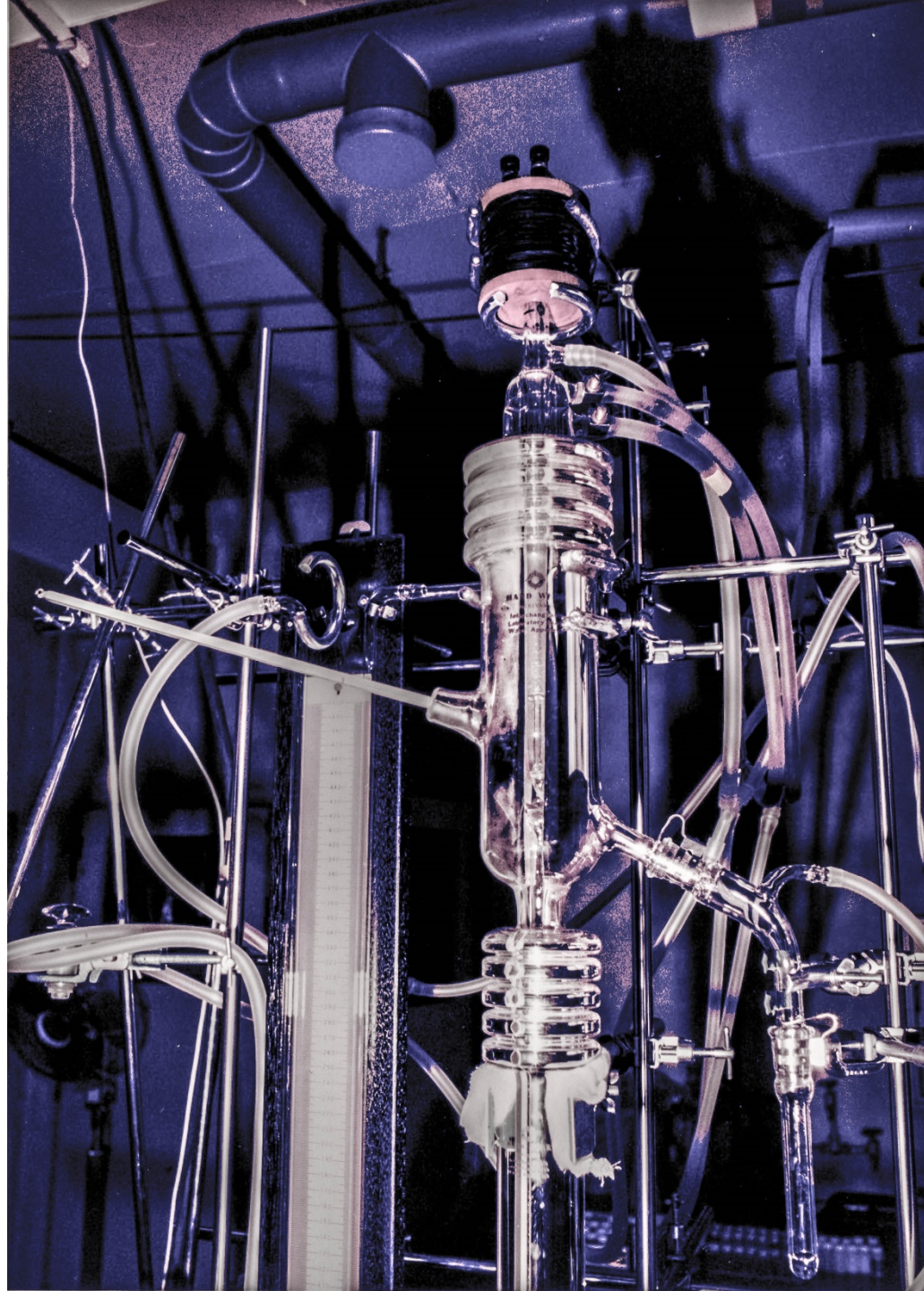
熱線の表面温度は
塔の上部では熱が取られて下がり、
下部では熱が除去され難く上がる。
分離が進むと数百度の差。

熱線は塔下部では
赤熱し、白熱して、遂には切断。

放射温度計で熱線表面温度を監視。
混合気体の分離状況も把握できる。

蒸留塔(気液界面の相平衡を利用した分離装置)

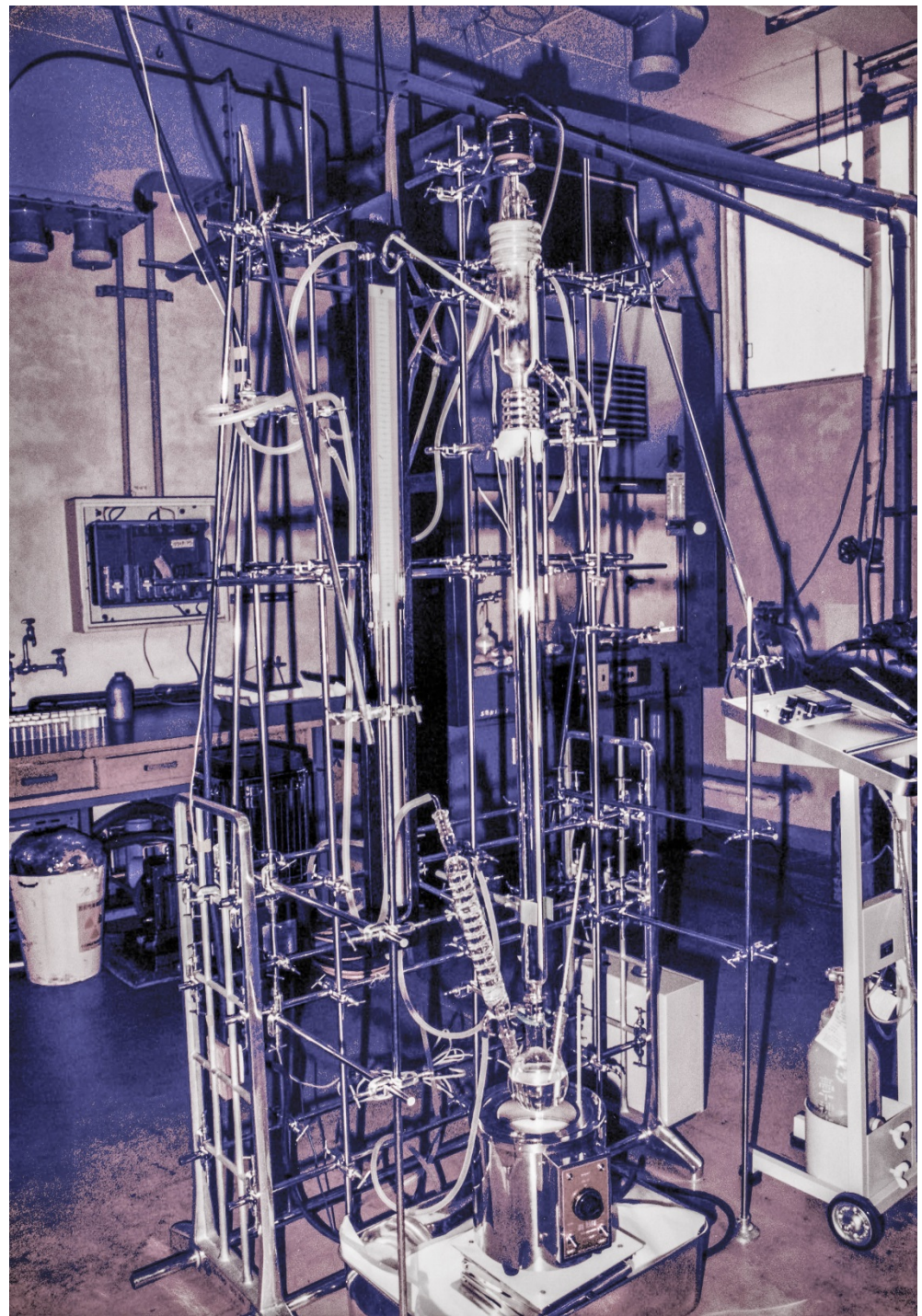
- 気体と液体の界面で混合物の気液2層平衡。蒸発しやすい成分(低沸点成分)が気体側、蒸発しにくい成分(高沸点成分)が液体側に濃縮。
- 蒸発、凝縮を繰り返して、分離を重ね。したがって、「蒸発、凝縮を行う界面を如何に広くとれるか」が分離度向上の要点。
- 水の蒸留では、トリチウム水(HTO)が液体側に濃縮。100℃ 1気圧では、軽水(H_2O)との蒸気圧比は、たったの 1.0283
- 気液接触面を増加させるためには、小規模塔では特に充填物の選択が重要。



水蒸留トリチウム同位体分離塔

原子核第2特別実験室内化学実験室に設置

熱電対保護管を加工したラシヒリングや
Dixon タイプ 充填物 (黄銅製金網から手作り)
各 200 cm³ を充填



Los Alamos Scientific Laboratory (LASL)

日米科学技術協力(核融合分野)人的交流計画

核融合燃料取扱い技術

第1回派遣研究者に選抜される(1979年夏)

派遣先 Tritium Systems Test Assembly (TSTA),

Los Alamos Scientific Laboratory

期間 当初計画 昭和54年度から 1～3年

実際 昭和55年2月 成田出国から帰国まで3週間

目的 トリチウムを用いた実験を実際に行い、

種々のノウハウを身に付けて

日本に核融合研究トリチウム実験室を作る準備をすること



2006年11月撮影



Albuquerque



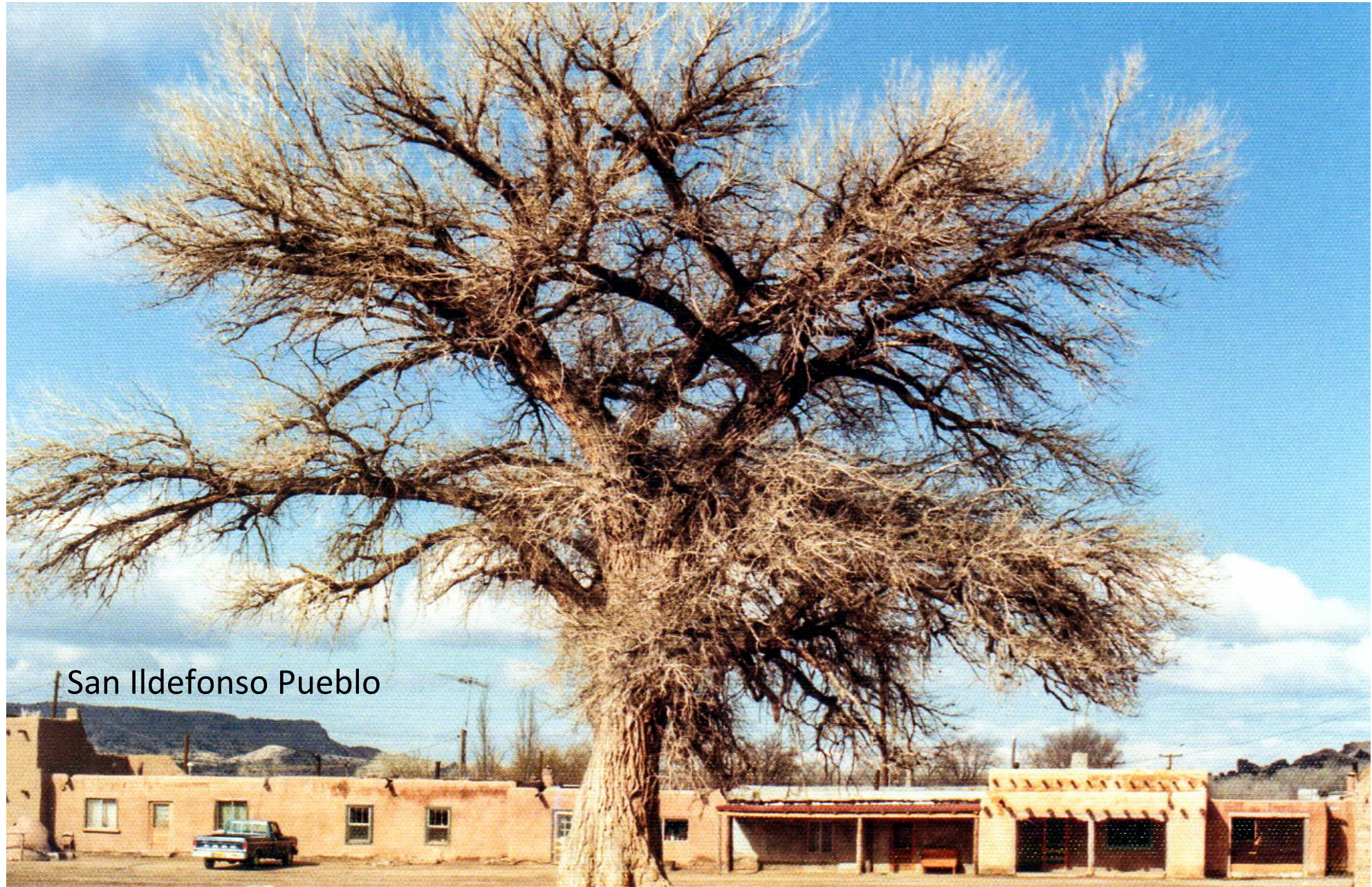
Black Mesa

**WELCOME TO
SAN ILDEFONSO PUEBLO**

SPEED LIMIT 15 MPH.
PHOTO PERMITS AT GOVERNORS OFFICE.
WATCH FOR CHILDREN AT PLAY.
KEEP OFF ALL KIVAS.
ALL TRIBAL LAWS ARE ENFORCED BY
TRIBAL POLICE.

SPEED
LIMIT
15





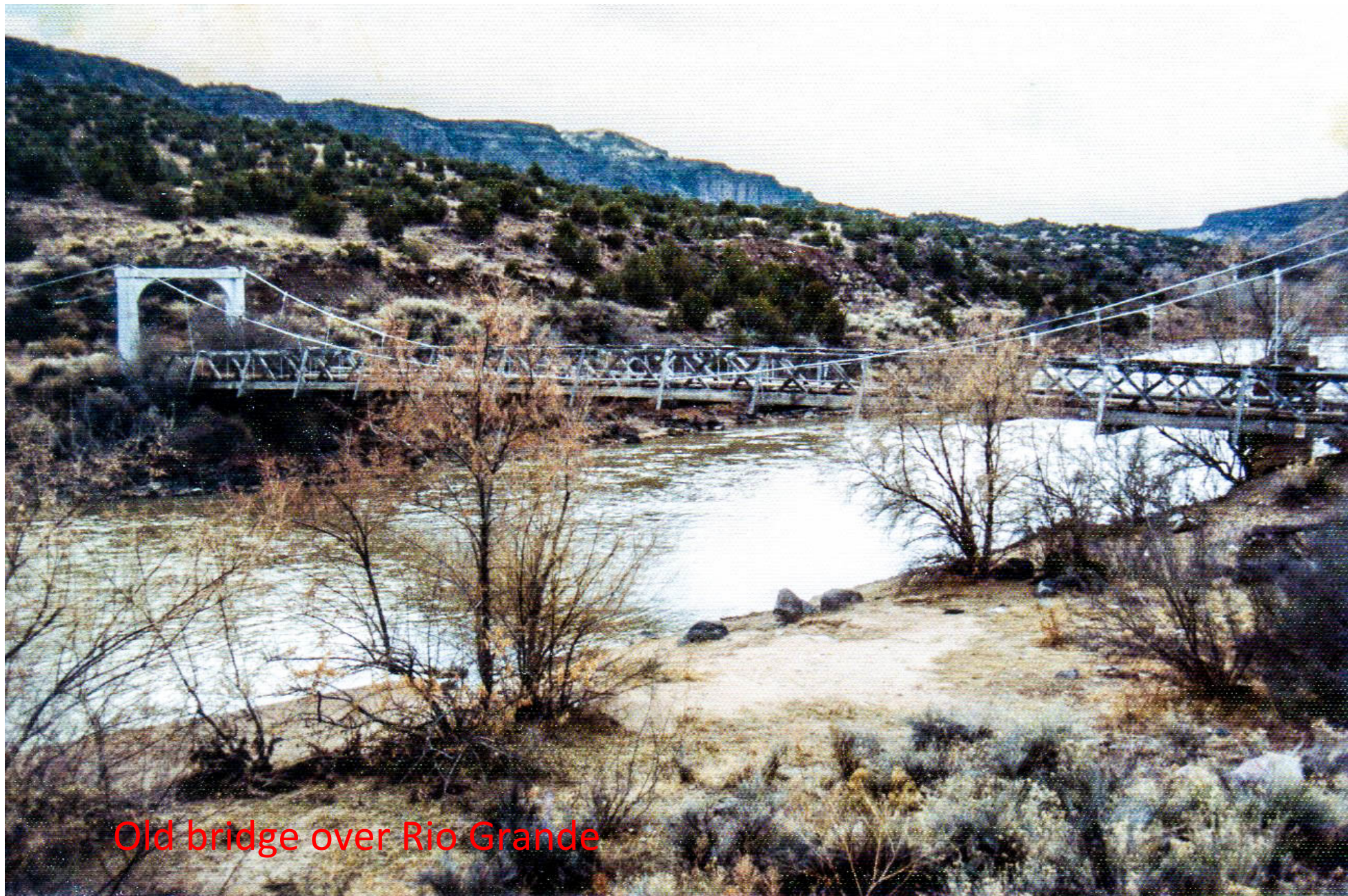
San Ildefonso Pueblo



Black Mesa



New bridge over Rio Grande



Old bridge over Rio Grande



Los Alamos Scientific Laboratory 付近の地形

Mesa メサ

頂上が比較的平らで周囲に急な崖を持つ、Plateauu ほど広くはない台地地形；米国南西部・メキシコの乾燥地帯によく見られる。(RHD)

研究所の施設は、メサの上に点在。
隣のメサの施設に行くには
扇のように広がるメサの要の点まで戻る必要



Rio Grande and Black Mesa



Mesa







TSTA building from a next adjoining mesa





Taos Pueblo



LASL
深冷蒸留水素同位体分離
予備実験装置

極低温実験室(Cryogenic Laboratory)
P-10 Laboratory

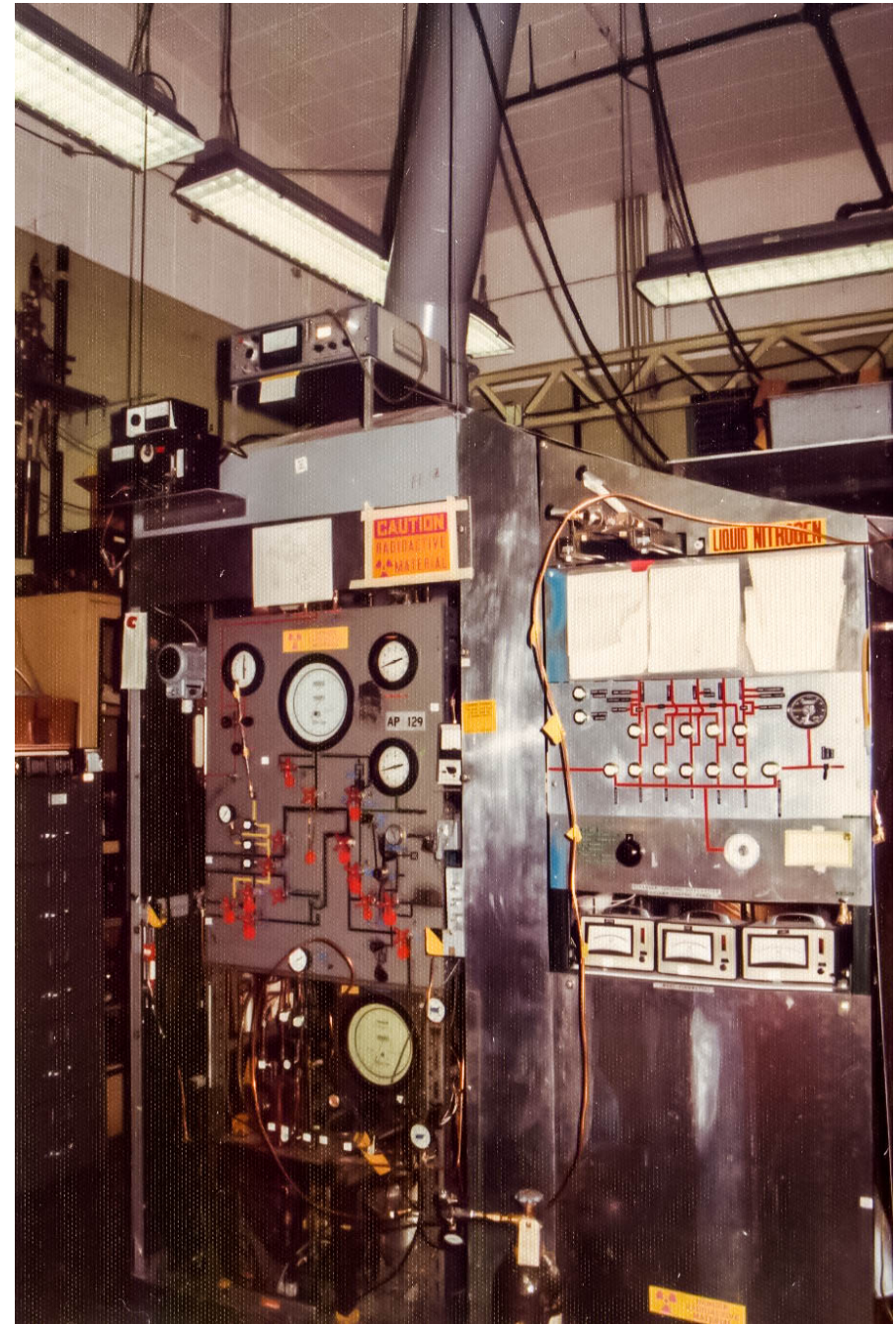
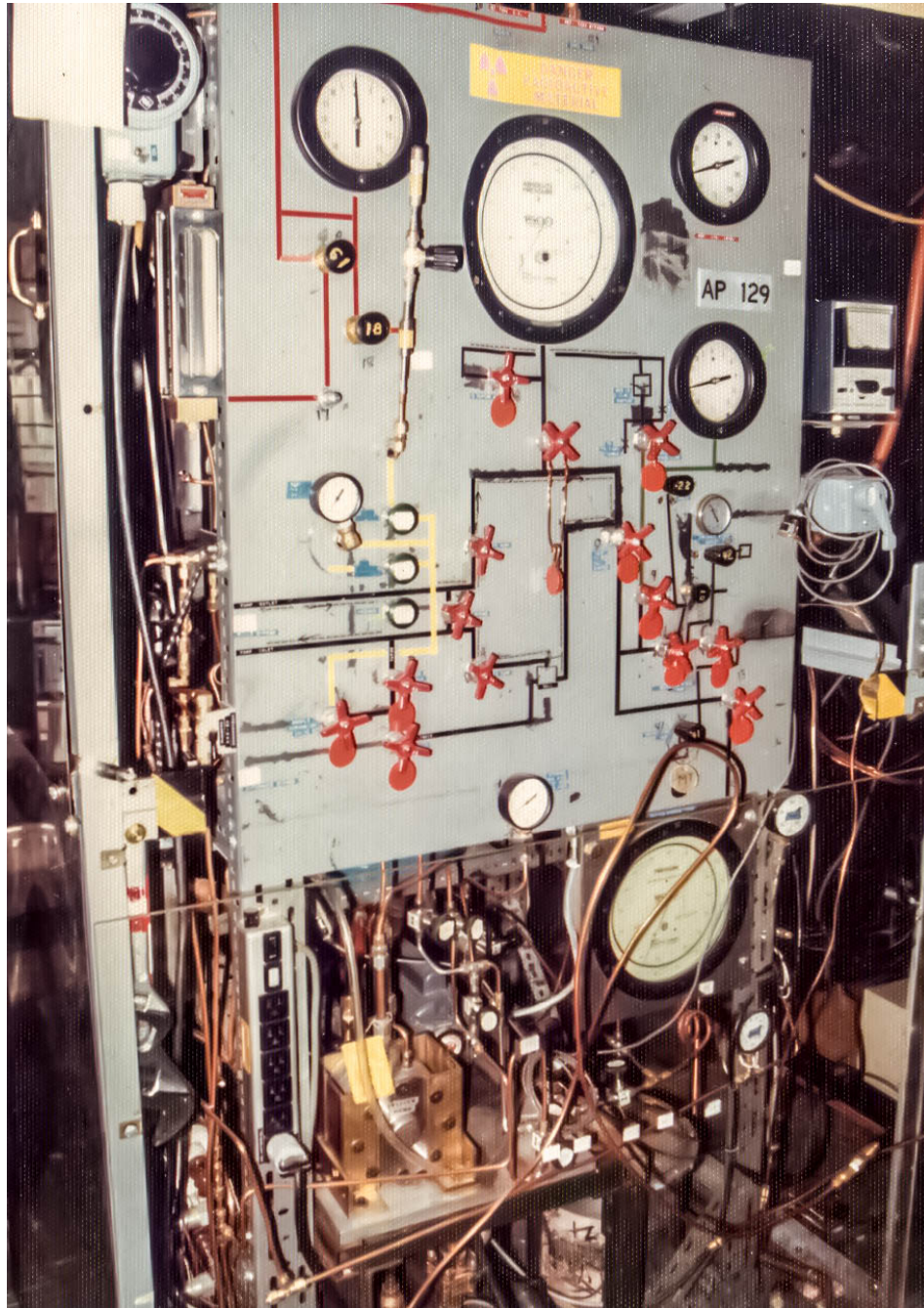


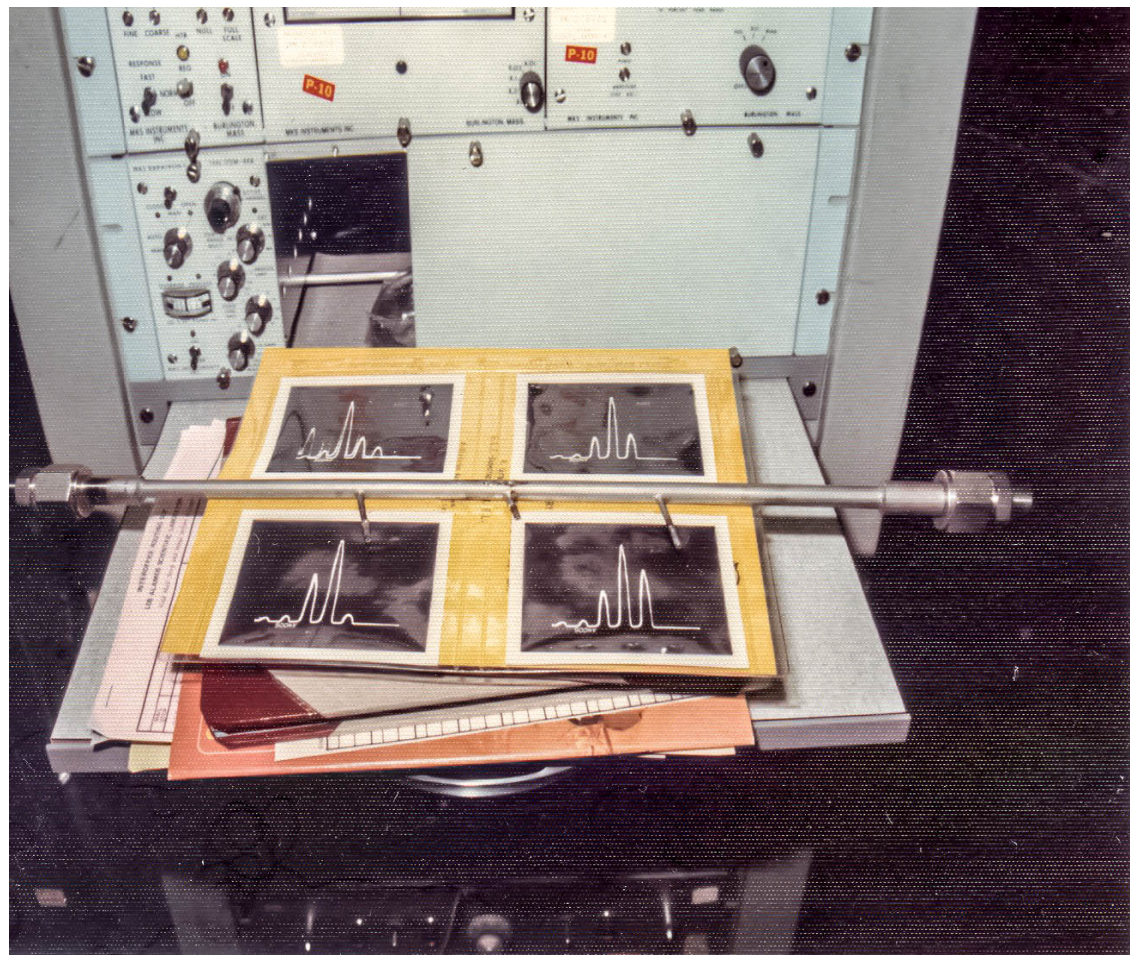
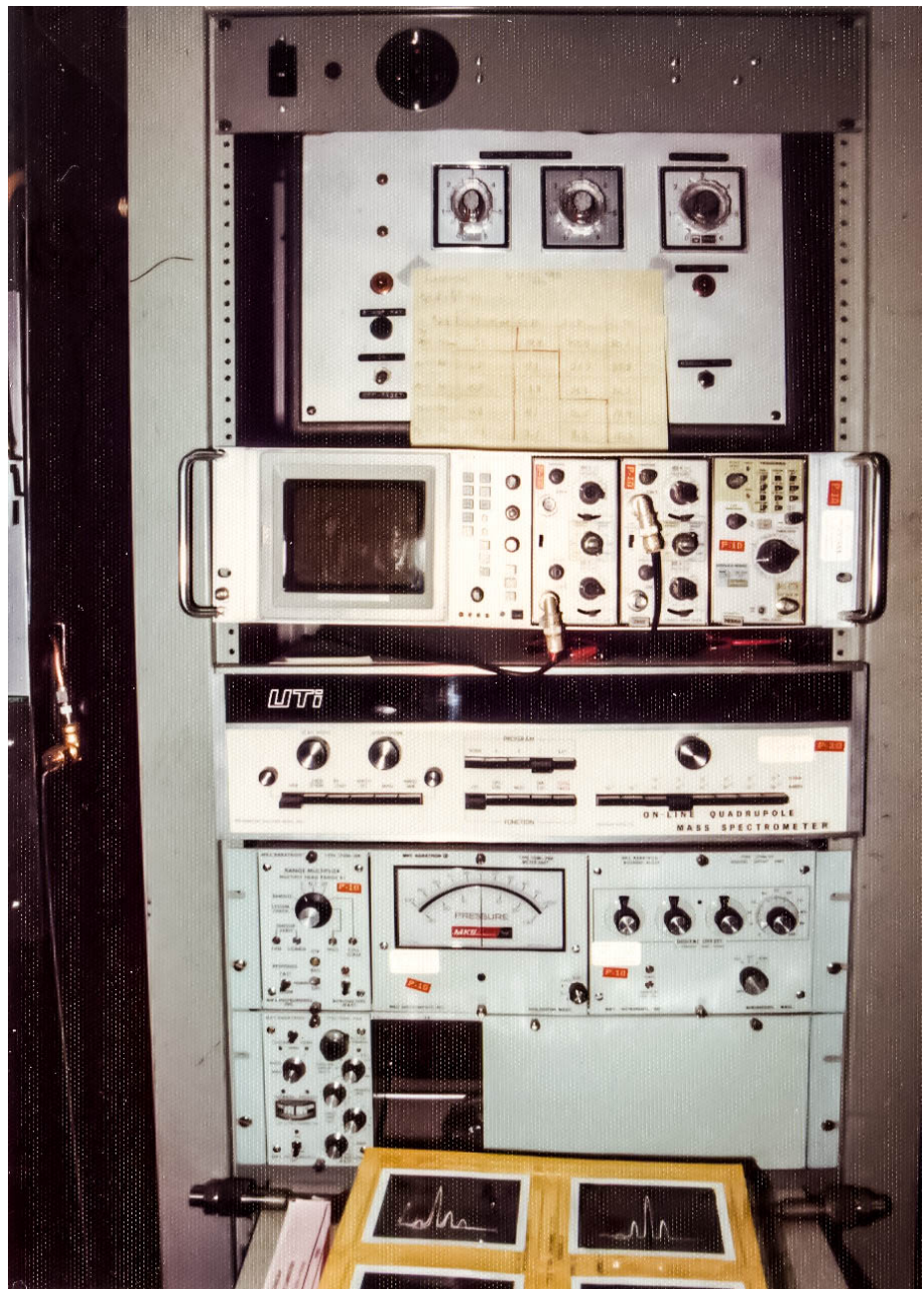


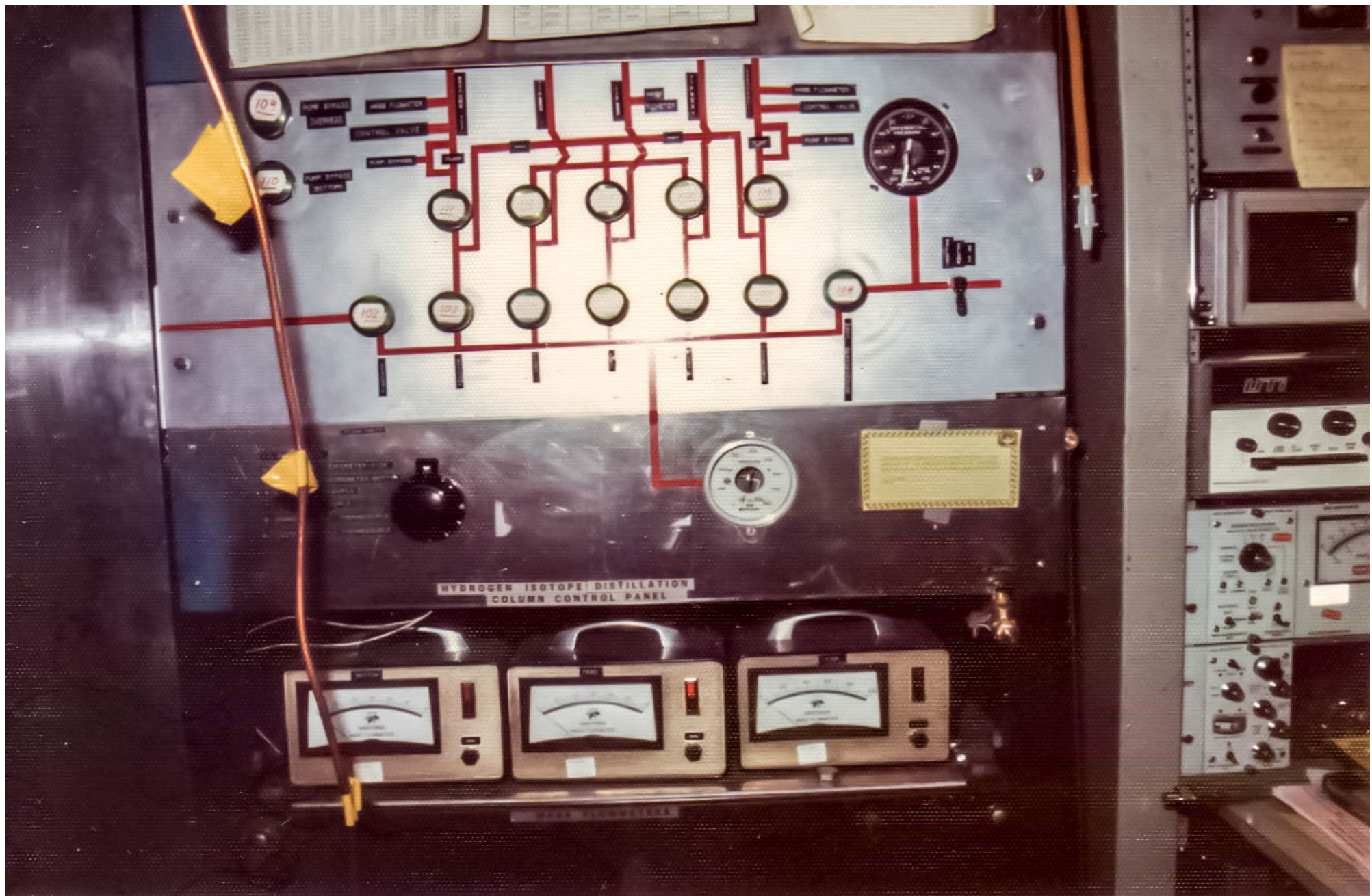
No Trespassing

By Order of the
United States
Department of Energy

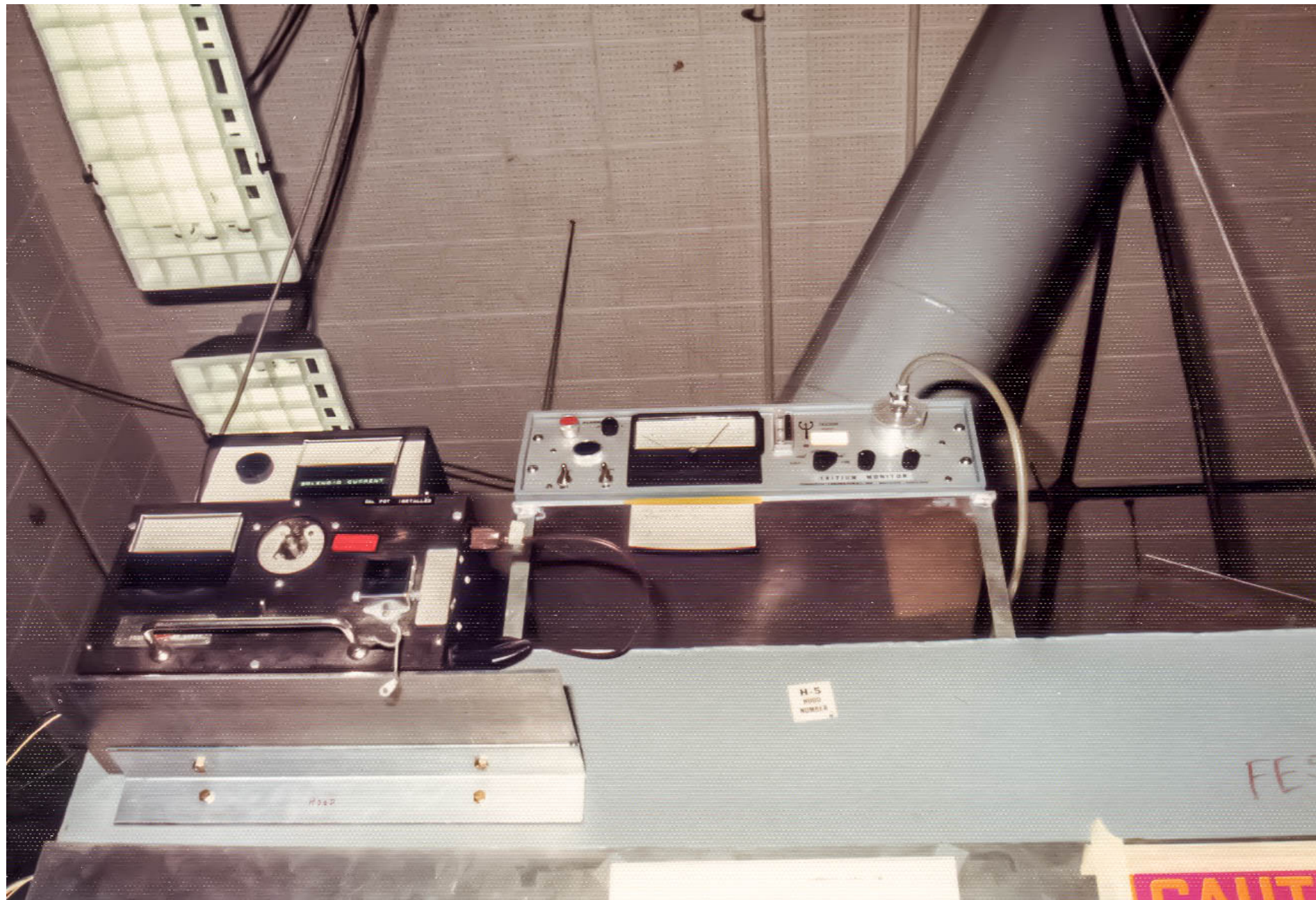
**ADMITTANCE RESTRICTED
TO BADGE HOLDERS
OR VISITORS
ACCOMPANIED BY
STAFF MEMBERS
OF Q-10**



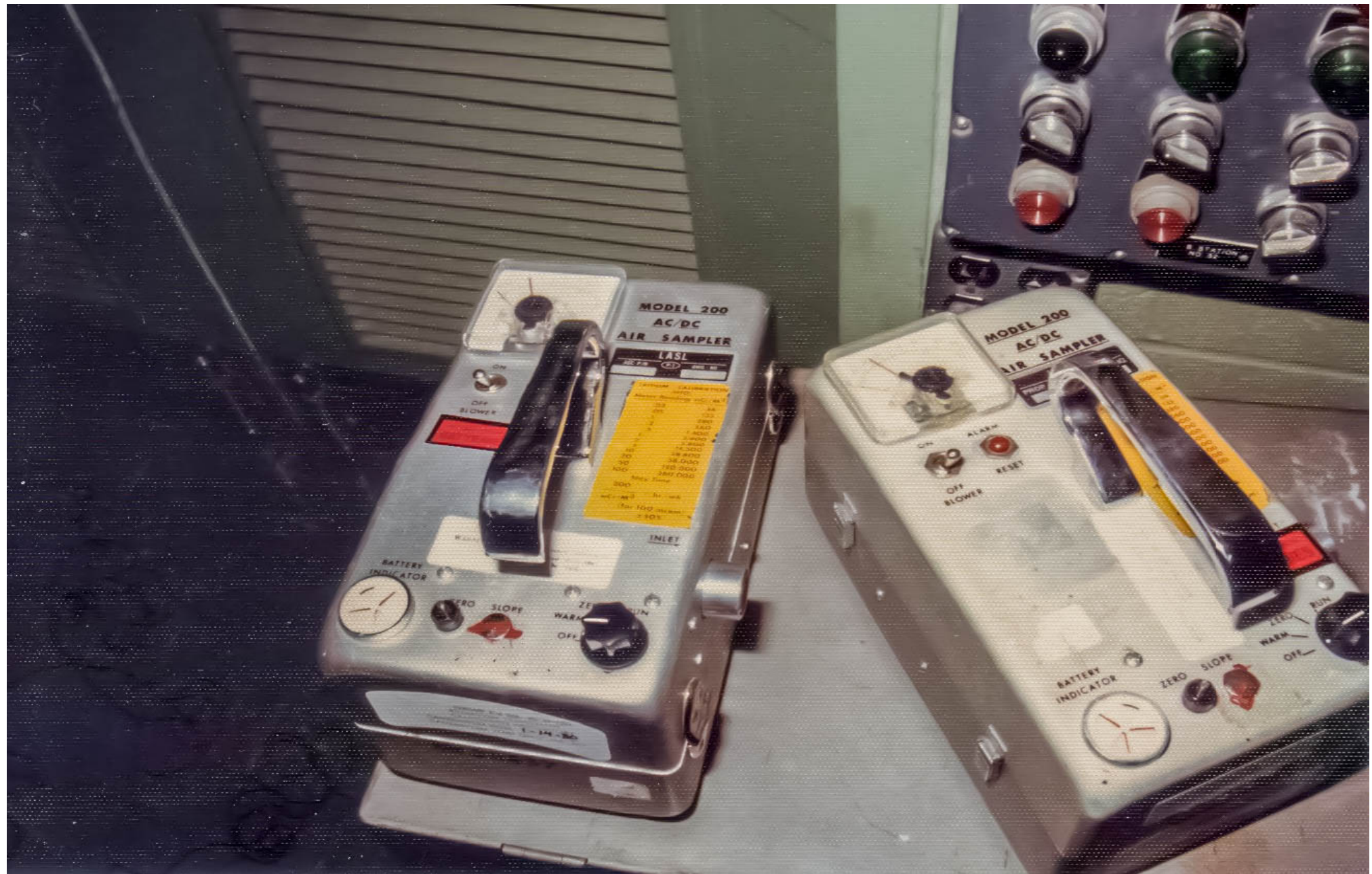












MODEL 200
AC/DC
AIR SAMPLER

LAST

CALIBRATION	
100	100
200	200
300	300
400	400
500	500
600	600
700	700
800	800
900	900
1000	1000
1100	1100
1200	1200
1300	1300
1400	1400
1500	1500
1600	1600
1700	1700
1800	1800
1900	1900
2000	2000
2100	2100
2200	2200
2300	2300
2400	2400
2500	2500
2600	2600
2700	2700
2800	2800
2900	2900
3000	3000
3100	3100
3200	3200
3300	3300
3400	3400
3500	3500
3600	3600
3700	3700
3800	3800
3900	3900
4000	4000
4100	4100
4200	4200
4300	4300
4400	4400
4500	4500
4600	4600
4700	4700
4800	4800
4900	4900
5000	5000
5100	5100
5200	5200
5300	5300
5400	5400
5500	5500
5600	5600
5700	5700
5800	5800
5900	5900
6000	6000
6100	6100
6200	6200
6300	6300
6400	6400
6500	6500
6600	6600
6700	6700
6800	6800
6900	6900
7000	7000
7100	7100
7200	7200
7300	7300
7400	7400
7500	7500
7600	7600
7700	7700
7800	7800
7900	7900
8000	8000
8100	8100
8200	8200
8300	8300
8400	8400
8500	8500
8600	8600
8700	8700
8800	8800
8900	8900
9000	9000
9100	9100
9200	9200
9300	9300
9400	9400
9500	9500
9600	9600
9700	9700
9800	9800
9900	9900
10000	10000

INLET

MODEL 200
AC/DC
AIR SAMPLER

LAST

BATTERY
INDICATOR

ZERO SLOPE

WARM OFF



Dr. James Anderson

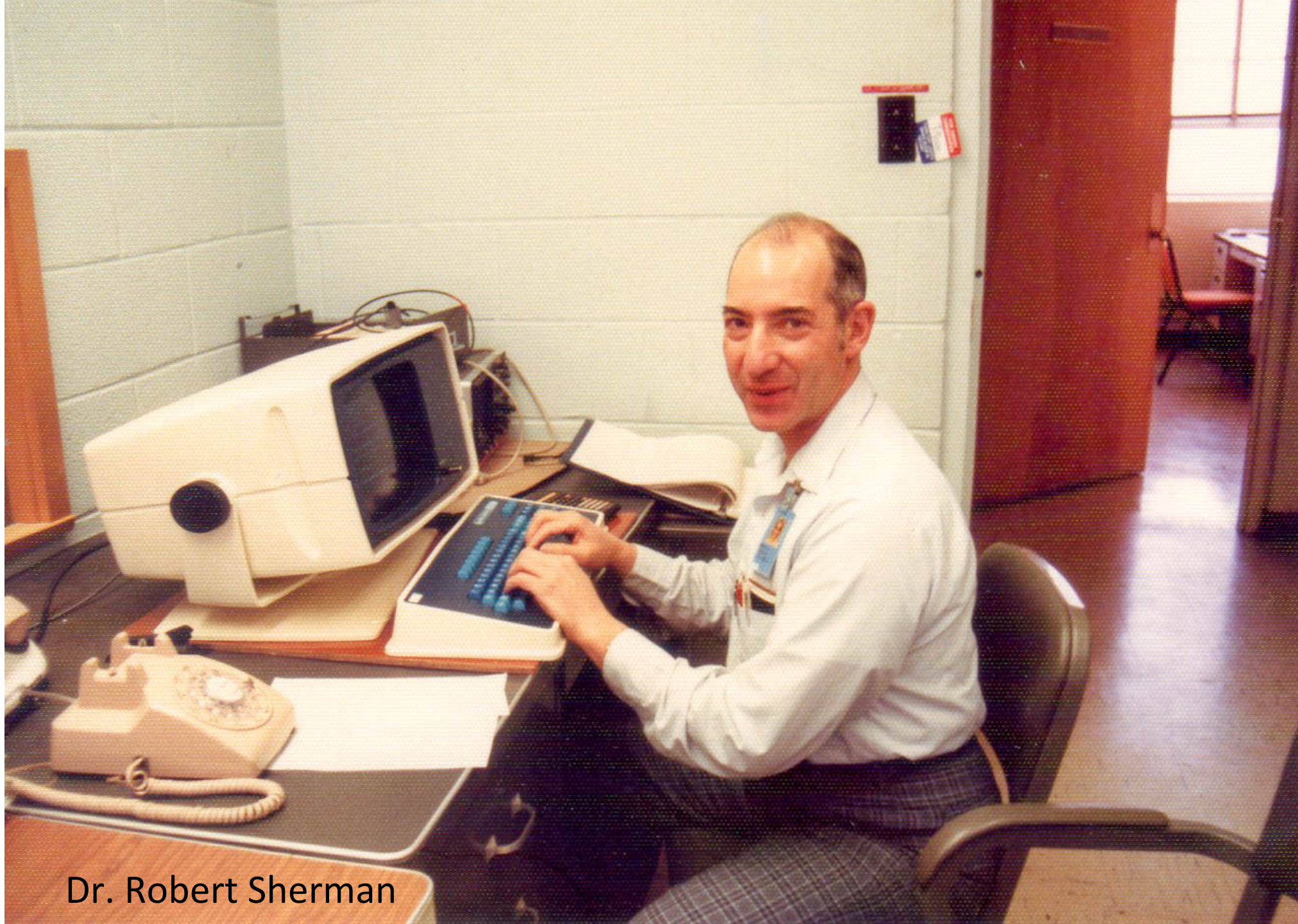


Dr. John Bartlit



水素深冷蒸留塔の充填物

Helipak のサンプルを
取り分けてもらっているところ



Dr. Robert Sherman



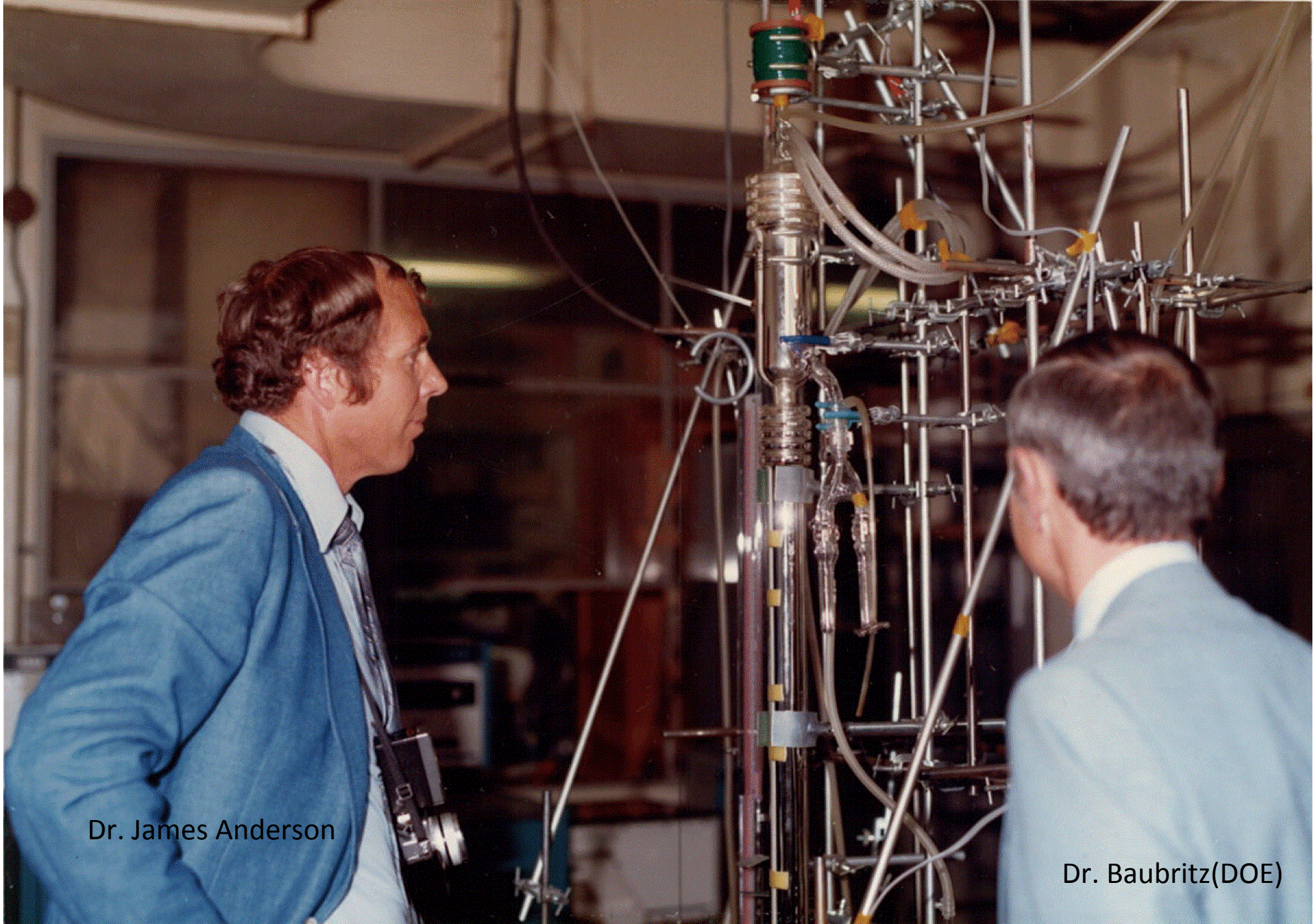
Dr. Roland Jalbert



TSTA を構成するプロセス・システムを
解析する計算機プログラムについて
内容を教えてくれた研究員

DOE, LASL 研究者が来訪

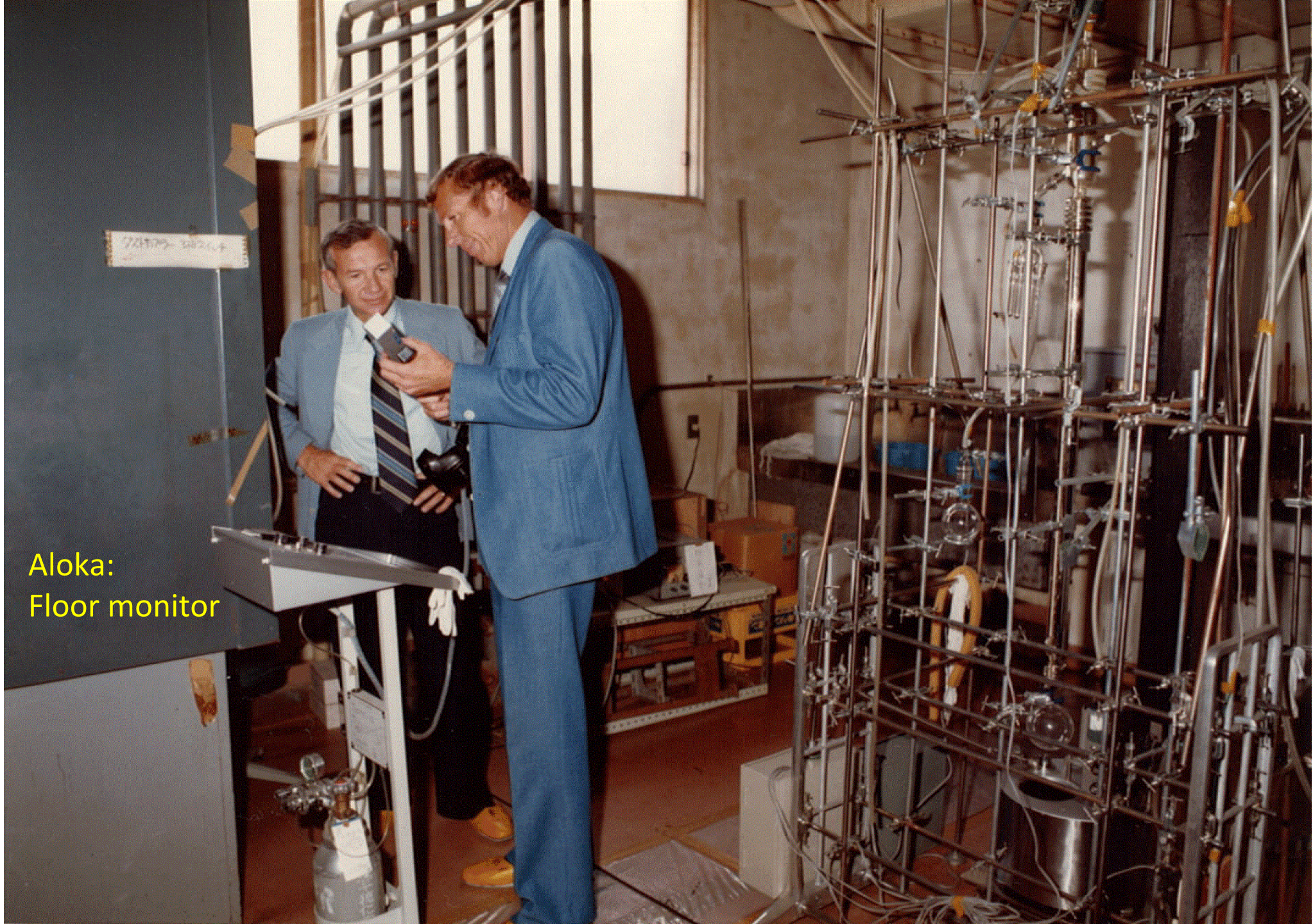




Dr. James Anderson

Dr. Baubritz(DOE)

Aloka:
Floor monitor





名古屋大学プラズマ研究所



同位体分離実験(装置)室の設置

- 昭和51年度辺りから概算要求準備開始
 - 核分裂炉燃料としてのウラン²³⁵濃縮, 重水濃縮
 - 核融合炉燃料としての水素同位体分離(特にトリチウム)
 - その他 リチウム, 炭素, 窒素 等
-
- 昭和55年度 「同位体分離実験装置」 設置決定
 - 昭和55年度 「同位体分離実験室」 設置決定

概算要求書

同位体分離実験装置

52.3.7

世話人 金川 昭

1. 要求事由

原子力産業における同位体分離の重要性は、原子力の開発が始まり始めに同位体分離を行うことから始められていた事実によっても明白であるが、近時その重要性は核分裂炉の核燃料サイクルの確立および環境汚染安全対策の確立が急務とされていくこととさらに核融合炉の開発のテンポが急速に高まって来たことなどから一層の増大をみせている。

現時点でもっとも重要な同位体分離は核分裂軽水炉等の燃料とされる濃縮ウラン製造としてのウラン同位体分離、重水減速剤の製造としての重水素同位体分離であるが、近時これに加えて核融合炉燃料たるトリチウム³Hの分離濃縮がきわめて重要な課題となつてきている。トリチウム同位体分離は核融合炉燃料の精製の立場からいふまでもなく、環境放射能汚染の立場から特に重要であり核融合炉排ガス処理においてきわめて重要な技術となり、このこととさらに核分裂炉および使用済核燃料再処理工場の排ガス処理においても同様に重要である。さらにトリチウム原料としてのリチウム同位体分離、原子炉材料としてのボロン同位体分離、核化学、核物理研究材料としての炭素、窒素、酸素、希ガス等の同位体分離も重要な課題となつていく。

一般的に、同位体分離は熱力学的にきわめて効率の悪い方法で行われていくことが多い。これに同位体分離が同位体間の質量の差異にもとづく僅少な同位体効果を利用して行われていくことによるが、その分離機構の詳細な探索および分離特性の系統的な解明によって、その分離効率を著しく向上せしめ得る可能性が十分に残されている。さらに、かかる分離効果の小さい単位分離工程を重ね組合せることによって所定の濃度を製品とする同位体分離が

金川教授手書き

拡散方式同位体分離装置 構成図

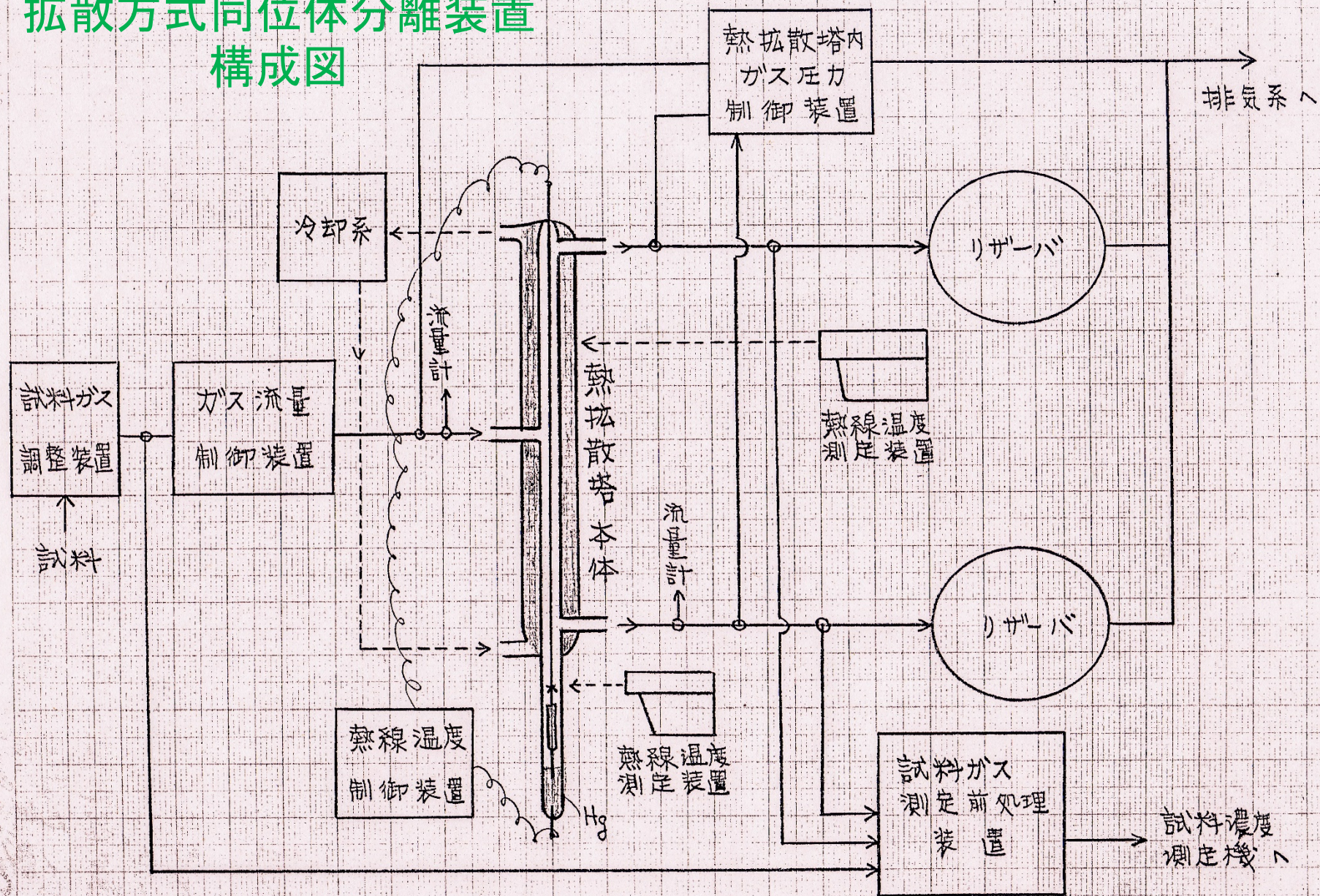


図1. 拡散方式 同位体分離装置 構成図

相平衡方式同位体分離装置構成図

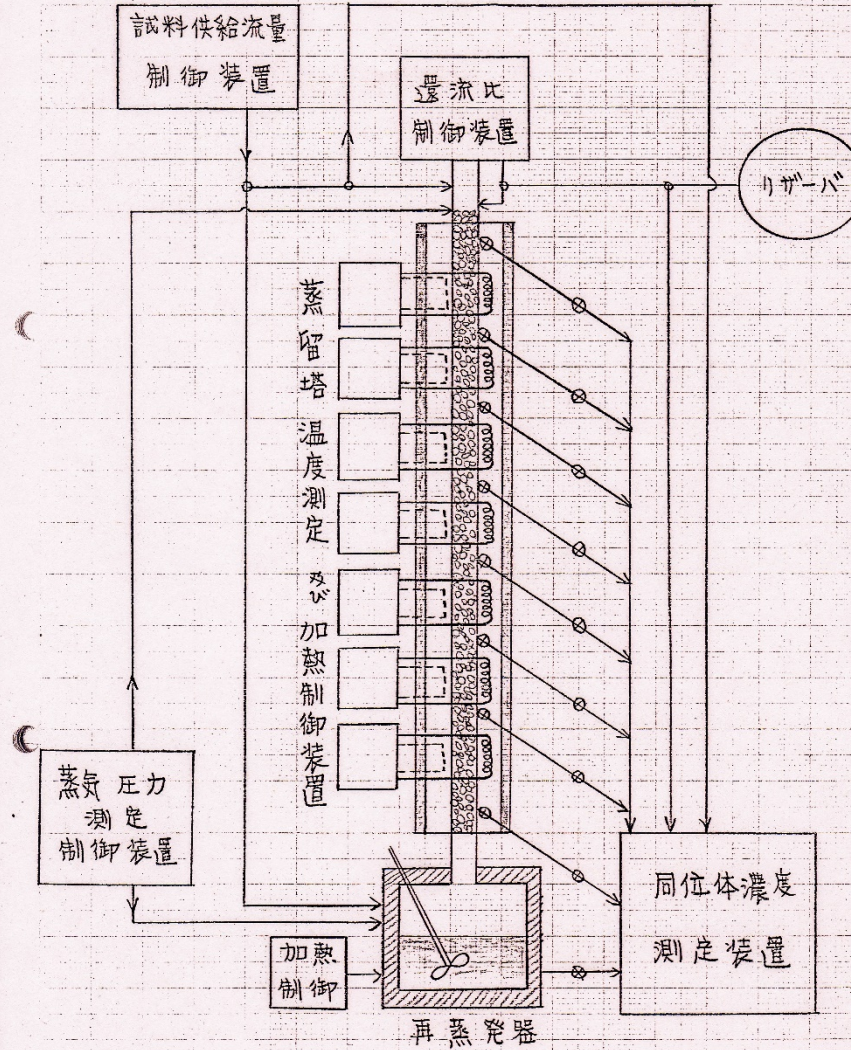
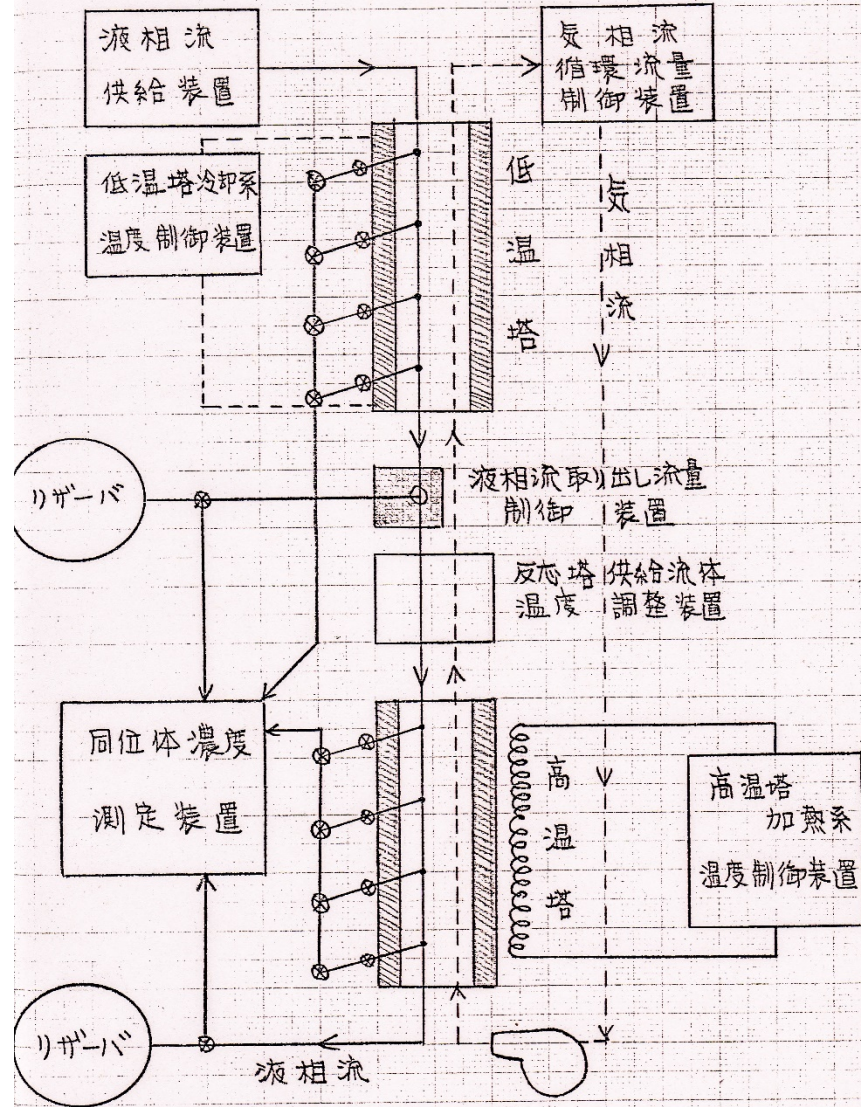


図1 相平衡方式 同位体分離装置 構成図

化学交換式同位体分離装置構成図



同位体分離実験装置設置時には製作をあきらめたが、現在では
ISL (同位体分離実験室) の主力装置

図1. 化学交換式 同位体分離装置 構成図

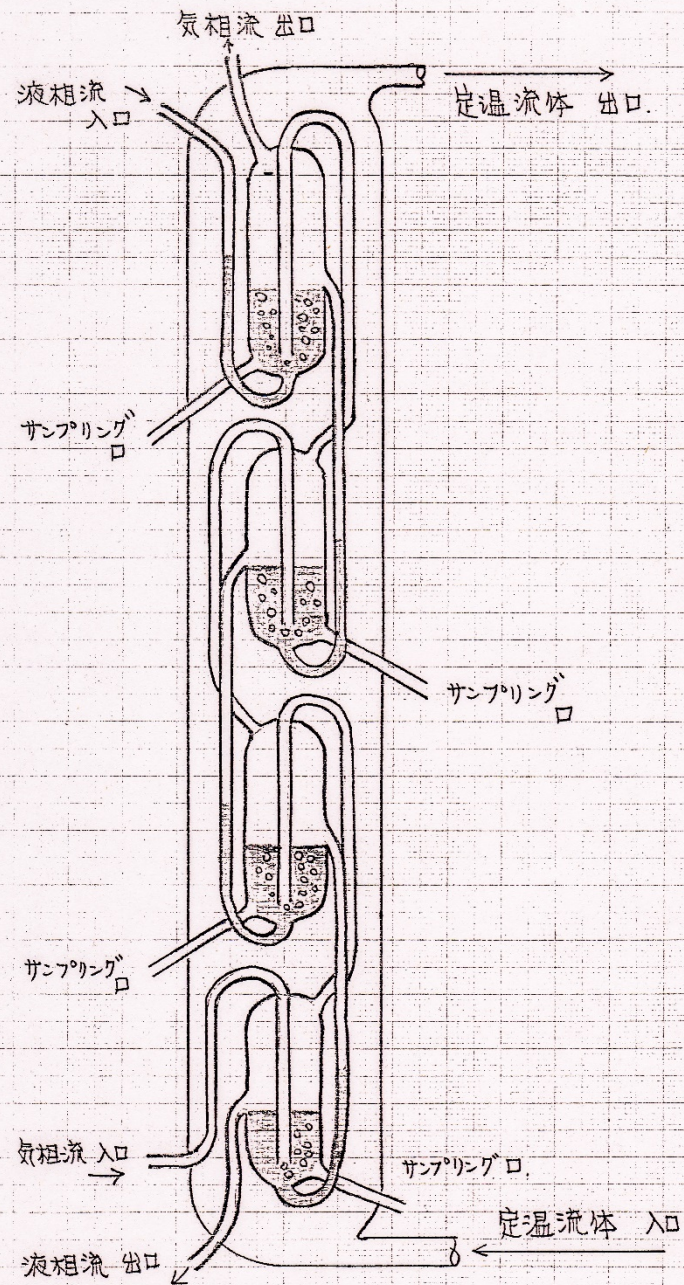


図2. バブルプレート 気液交換反応管

(参考1) 同位体分離実験装置 説明資料

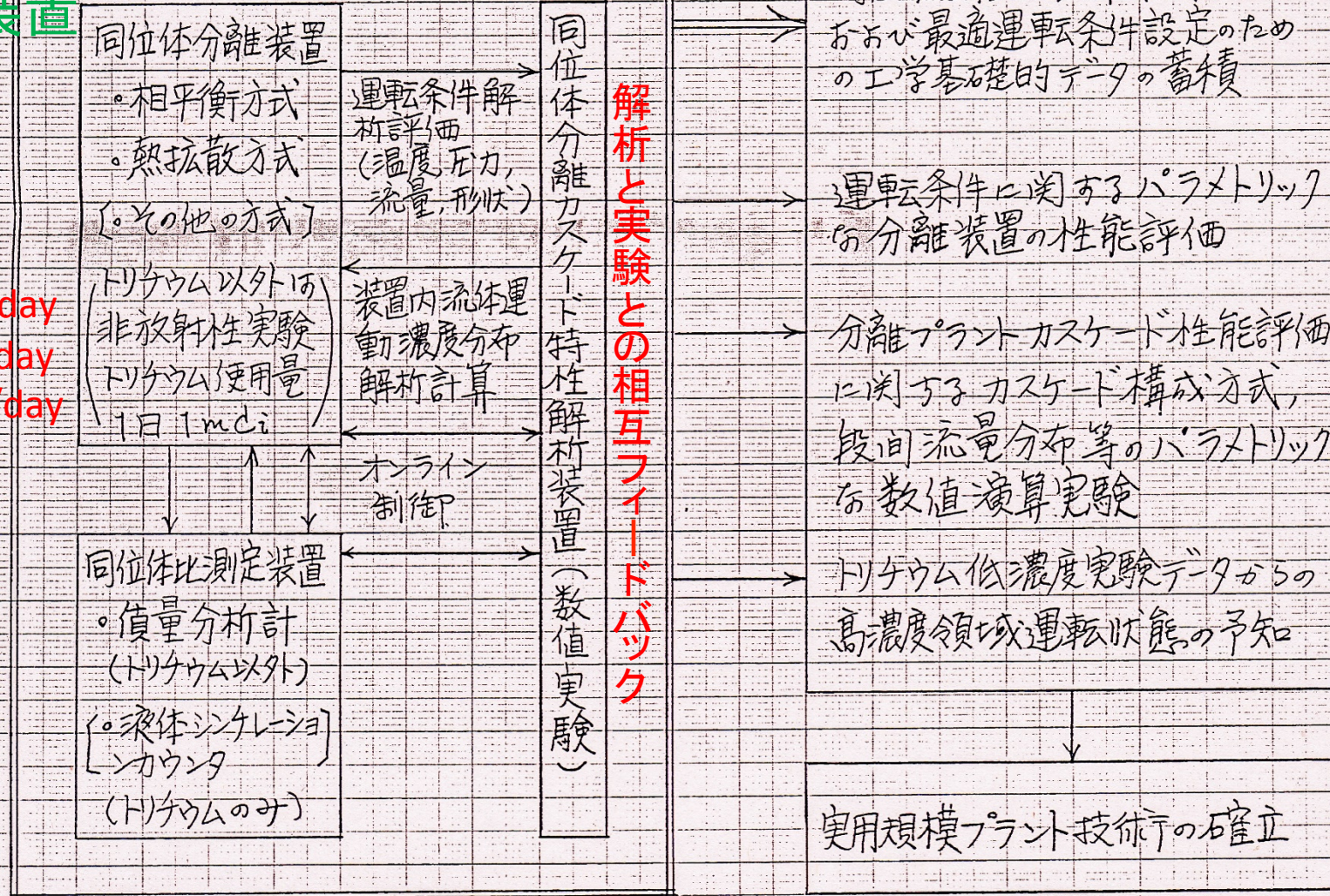
表1 同位体分離 重要例

元素	注目同位体	天然存在比(%)	事由
水素	D(重水素)	0.015	中性子吸収断面積が著しく小さい。減速剤
	T(トリチウム)	~0	核融合炉燃料, トリチウム環境汚染
リチウム	${}^6\text{Li}$	7.5	トリチウム生産原料 ${}^6\text{Li} + n \rightarrow \text{T} + {}^4\text{He}$
	${}^7\text{Li}$	92.5	中性子吸収断面積が小さい。溶融塩炉
ホウ素	${}^{10}\text{B}$	18.7	中性子吸収断面積大, 制御材, 医療
窒素	${}^{15}\text{N}$	0.365	トレーサー利用
酸素	${}^{18}\text{O}$	0.204	トレーサー利用
ウラン	${}^{235}\text{U}$	0.72	核分裂炉燃料, ウラン濃縮

分離装置内外の温度、圧力、流量等を計測・制御できる装置

仕様の対象

実際には
 気体 10 mCi/day
 液体 100 mCi/day
 合計 110 mCi/day
 認可



同位体分離実験装置 (【 】内は要求事項に含まない) 分離装置本体は逐次改良して入れ替え 分離装置本体には仕様を設定せず

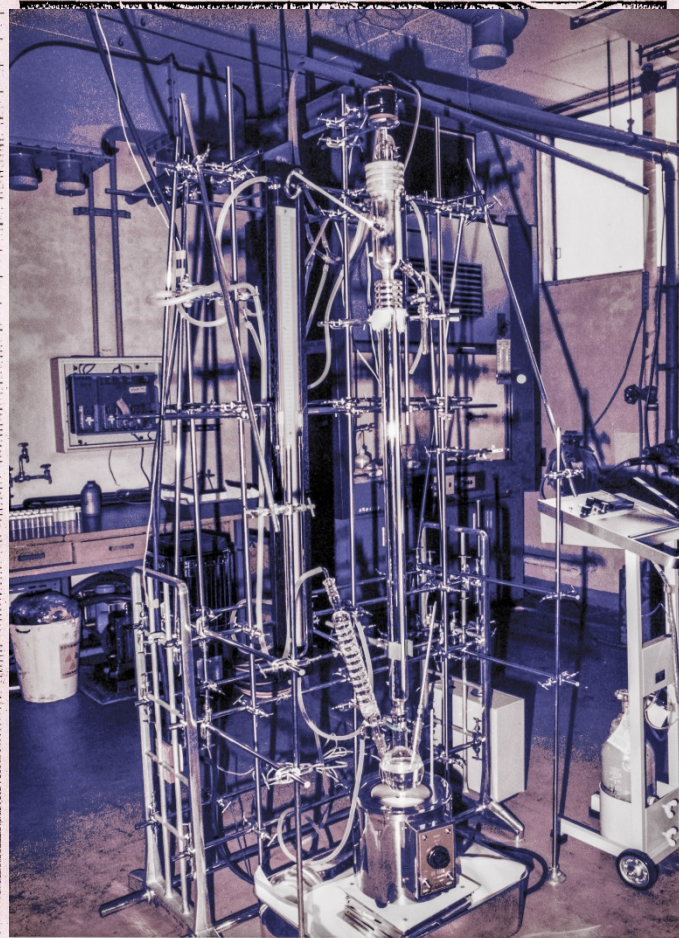
図1 同位体分離実験装置の意義と各構成設備の位置づけ

(参考2) 相平衡方式同位体分離装置(蒸留塔) 説明資料

原理: 混合物の蒸気圧の差を利用した分離法

目的: 多段交流蒸留分離塔の分離効率の向上

装置の概要:



凝縮器 — 冷却水温度, 流量
計測制御

蒸留塔
本体 — 塔内温度分布,
蒸気通過流量,
液流下流量
計測制御

蒸発器 — 蒸発蒸気量, 温度
圧力計測制御

(運転条件制御)

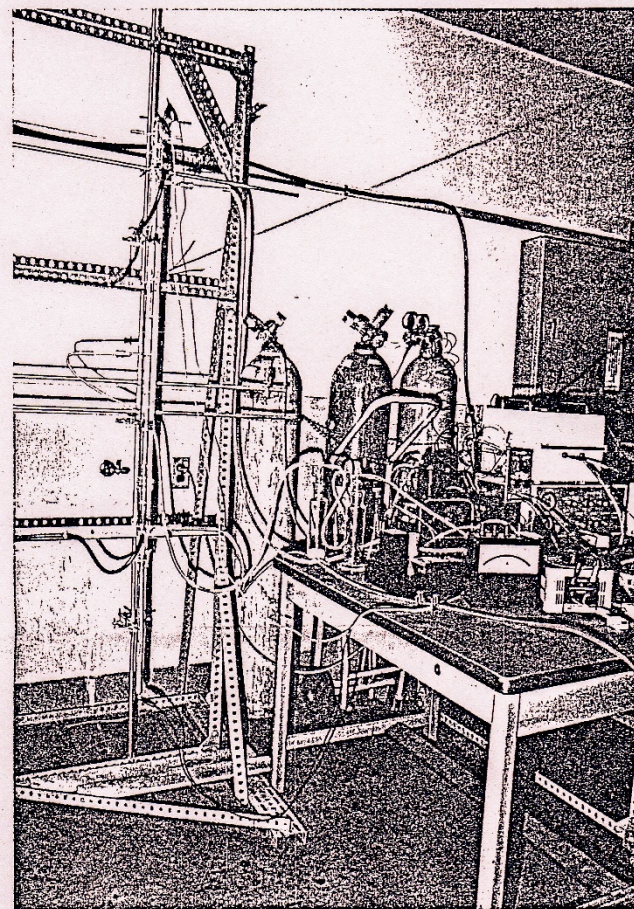
写真1 トリウム水同位体分離用蒸留予備実験装置

(参考3) 熱拡散方式同位体分離装置(熱拡散塔) 説明資料

原理: 混合物の温度勾配下の拡散移動速度の差を利用した分離法

目的: 多段向流熱拡散分離塔の分離効率の向上

装置の概要:



熱拡散塔
本体

塔内温度分布
ガス循環流量
ガス圧力
計測制御

原料ガス
供給ポンプ

ガス供給流量
カット, 原料
濃度
計測制御

熱線温度
調整器

熱線温度
計測制御

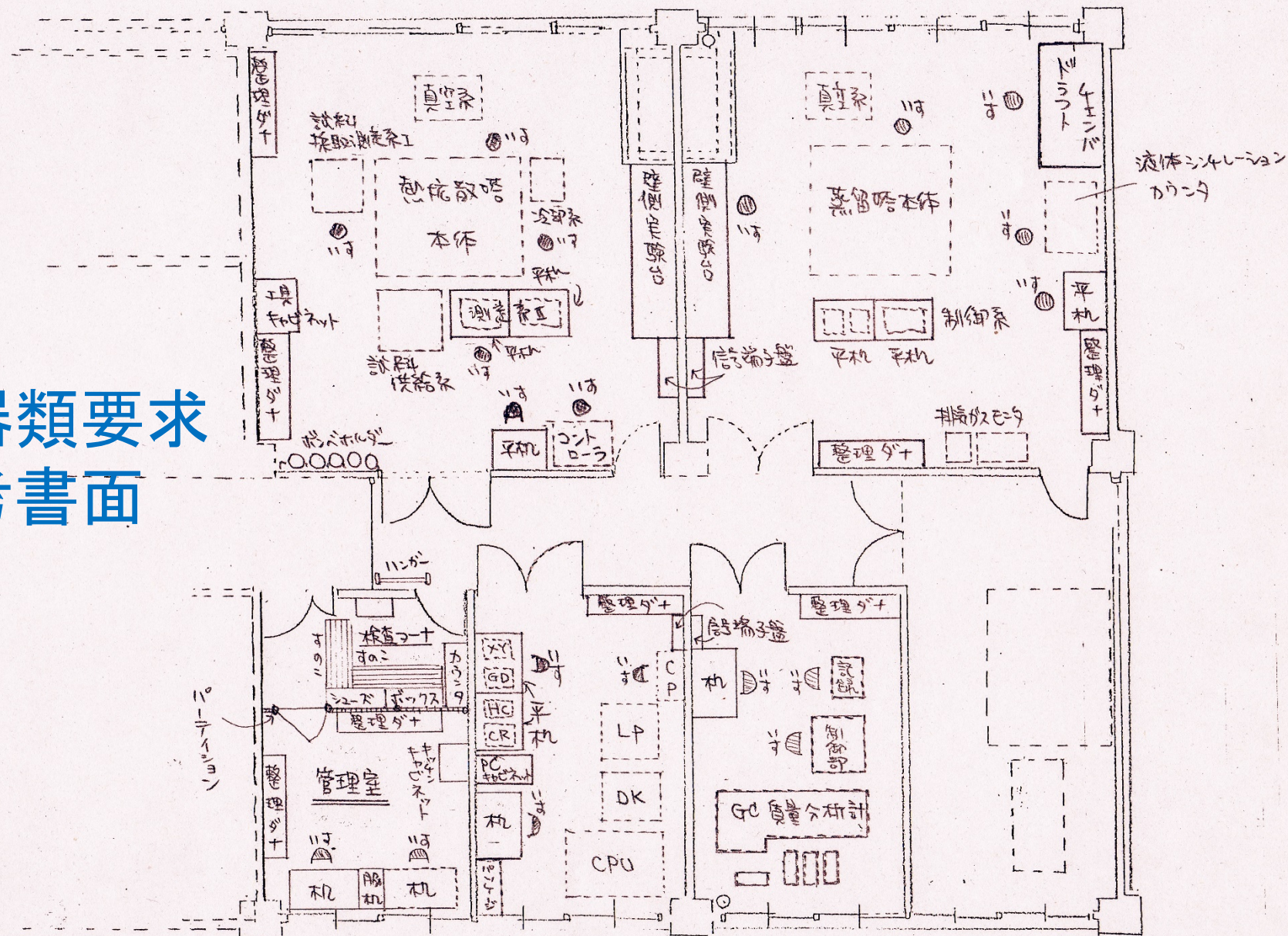
(運転条件制御)

写真2 希ガス同位体分離用熱拡散予備実験装置

実験装置 配置参考図



什器類要求 参考書面

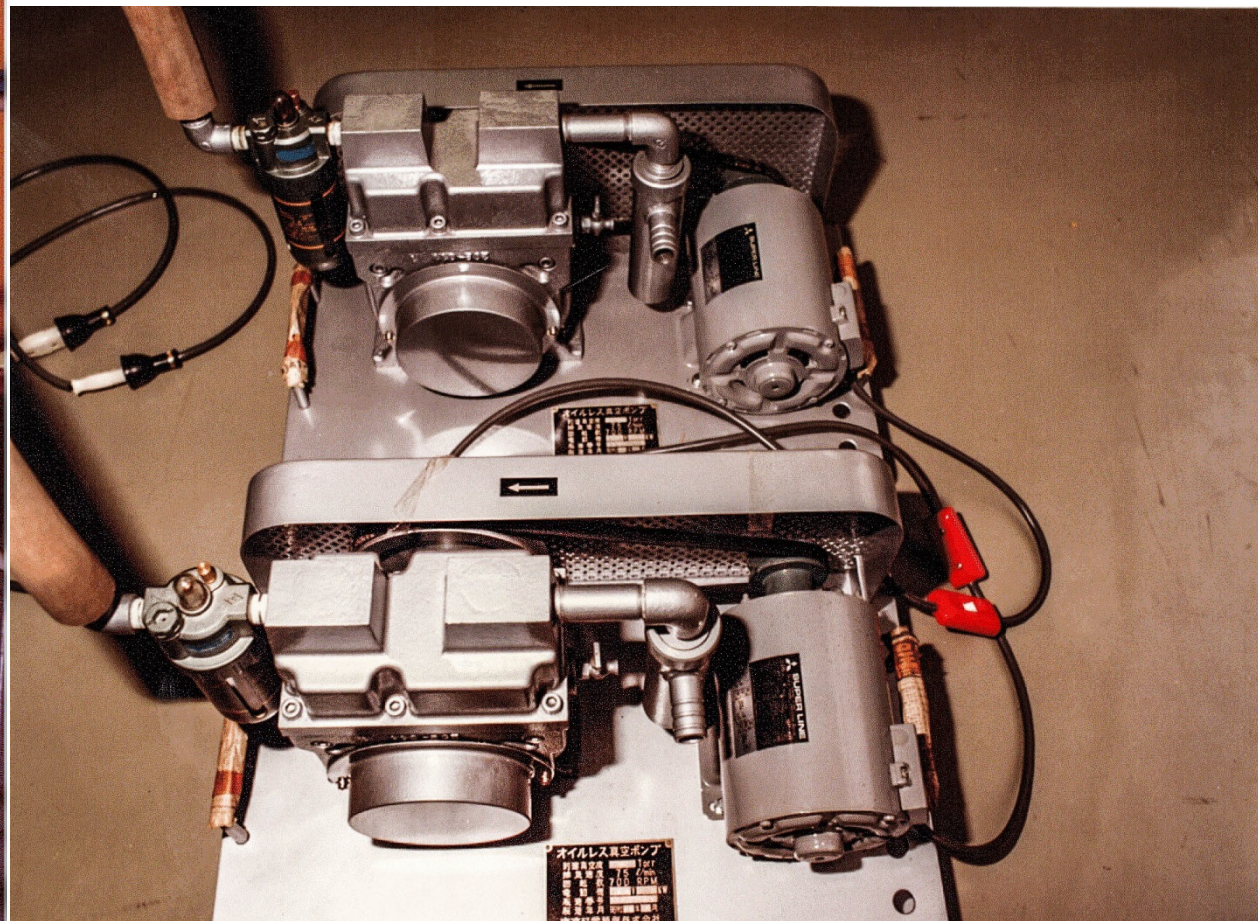
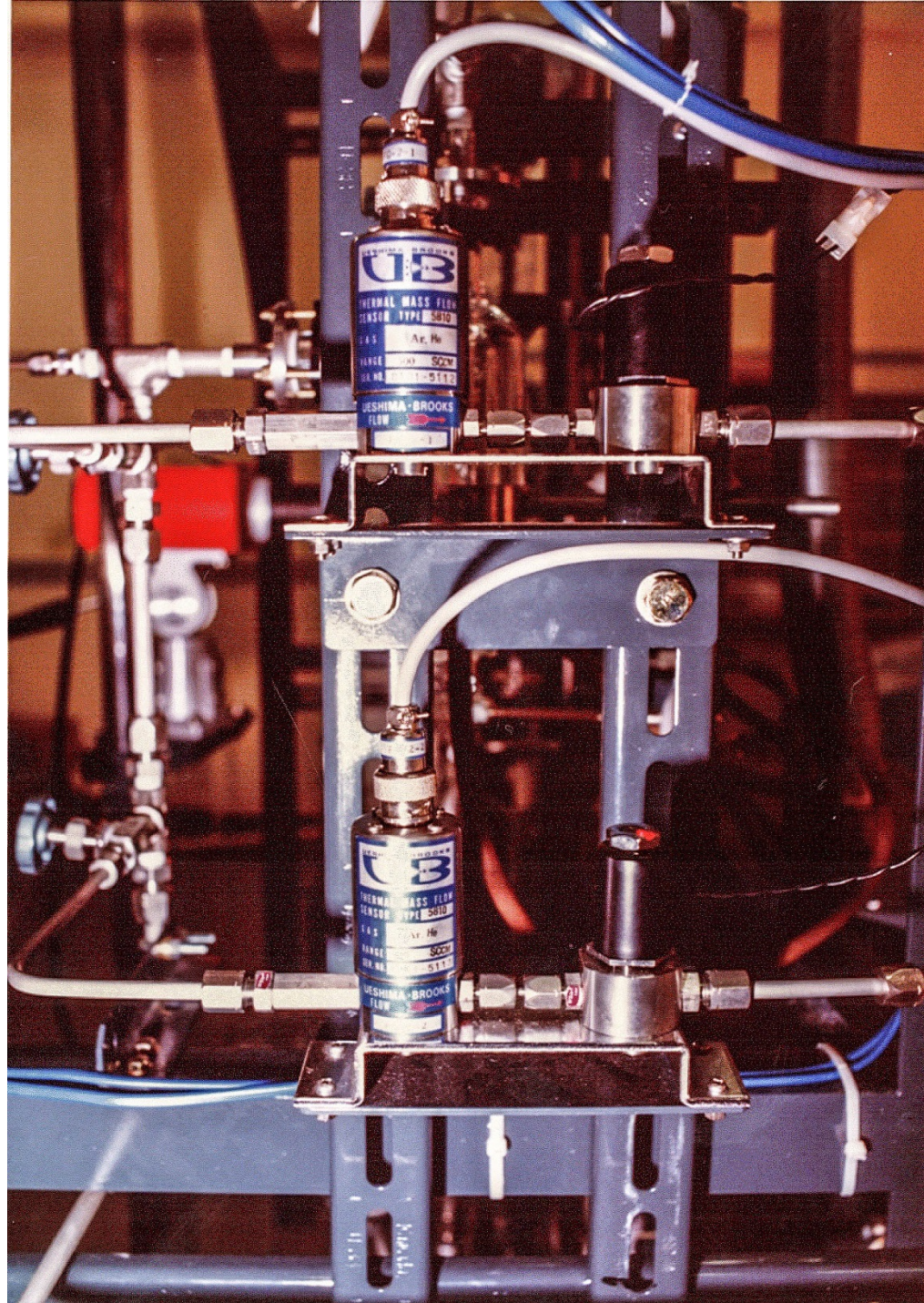


トリチウム取扱い施設 申請準備書面

トリチウム取扱施設					
所属科・部課名	名古屋大学 工学部				
施設名称	原子核第2特別実験室内 化学実験室		* 同位体分離実験室 (建設中) 昭和55年度		
施設面積(m ²)	32 m ²	* 222 m ²	研究室面積(m ²)	0 m ²	* 0 m ²
トリチウム	Ci/回	*			
取扱量	Ci/日	5 mCi	110 mCi (トリチウム水 100 mCi トリチウムガス 10 mCi)		
	Ci/年	1 Ci	10 Ci (申請中)		
最大貯蔵量Ci		20 Ci			
研究者数	専任員	2名 (金川 昭, 山本一良)			
	学生	学部4名 大学院4名			
主要設備備品名	水蒸留法 同位体分離予備実験装置。液体シンチレーションカウンタ				
現有	(Aloka LSC-602)。[熱拡散分離塔 ← コールドエリア]				
* 昭和55年度 予算購入	相平衡式同位体分離実験装置。熱拡散式同位体分離実験装置。 GC-MS 質量分析計 (日立 M-80)。同位体分離 カスード 解析装置 (HITAC E-800システム)。トリチウム・スタッフ モニタ (Aloka RIC-510)。				
主要研究課題名	水蒸留法 による トリチウム 同位体分離				
と概要(1/4/100 字以内)	有効塔長 100 cm の 充填式 蒸留塔を 試作し、リボウ 温度、 充填物 種類 などを 変化させ、全濃度 並びに 同分蒸留 特性を 測定。 新装置では、蒸留塔 各部分の 温度・圧力・流量 を 詳細に 測定 かつ 制御し、連続 蒸留 分離 実験を する 予定。				
	熱拡散法 による 水素 同位体 分離				
	現在、熱拡散塔は コールドエリア に 設置 されており、Ar-He 混合物 を用いて 分離 実験を 続けている。熱線 温度、流量、カットを 変化させ 分離 特性を 測定 している。				
	蒸留塔・熱拡散塔の シミュレーション				
	分離塔 内部の 流れ、温度、圧力 分布 などを あらやす 基礎 方程式 系 を 直接 数値 解法 することにより、塔 内部 状態を 求め、分離 特性を 推定し、塔の 改良、最適 運転 条件 探索の 基礎 データ と している。				

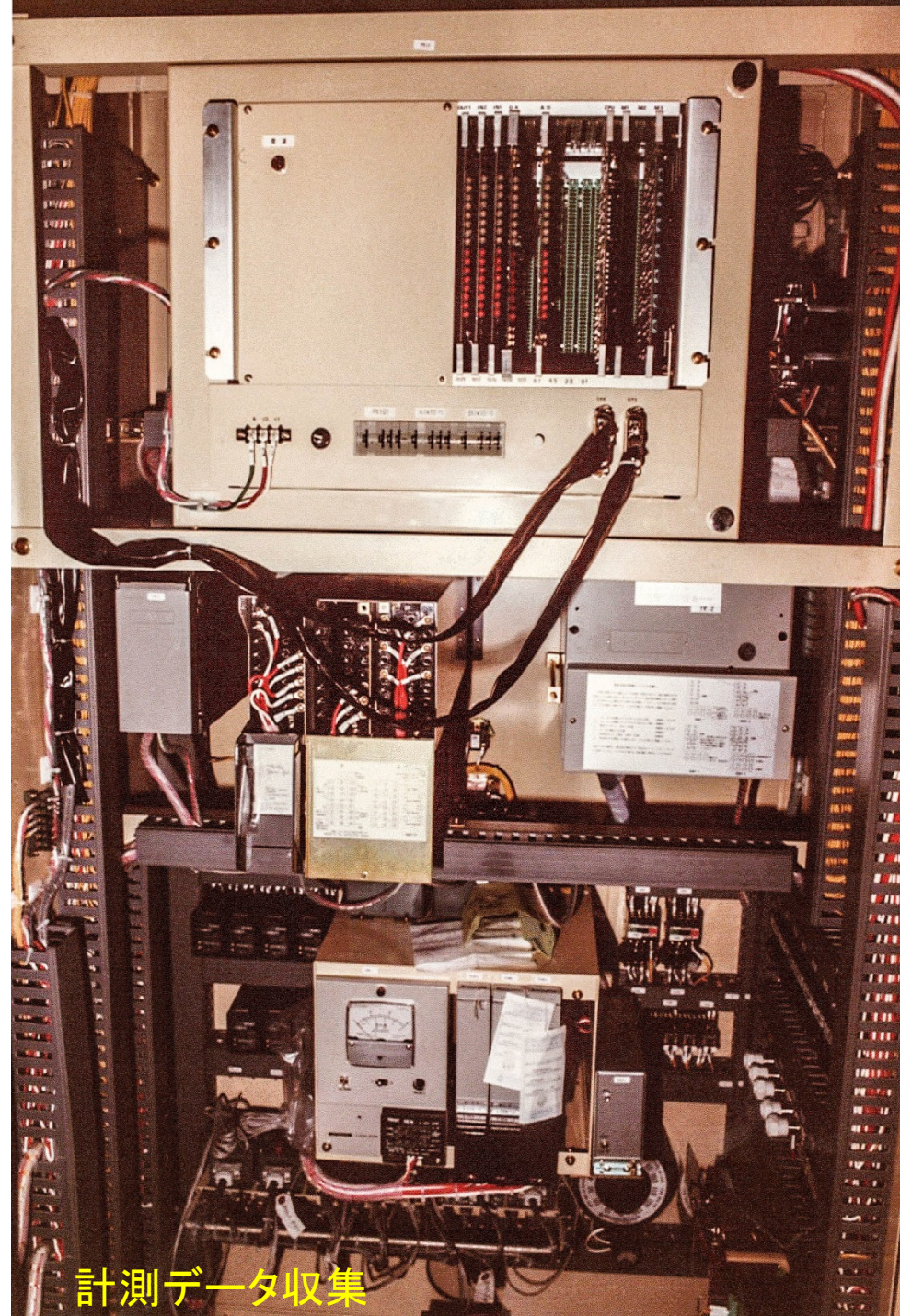
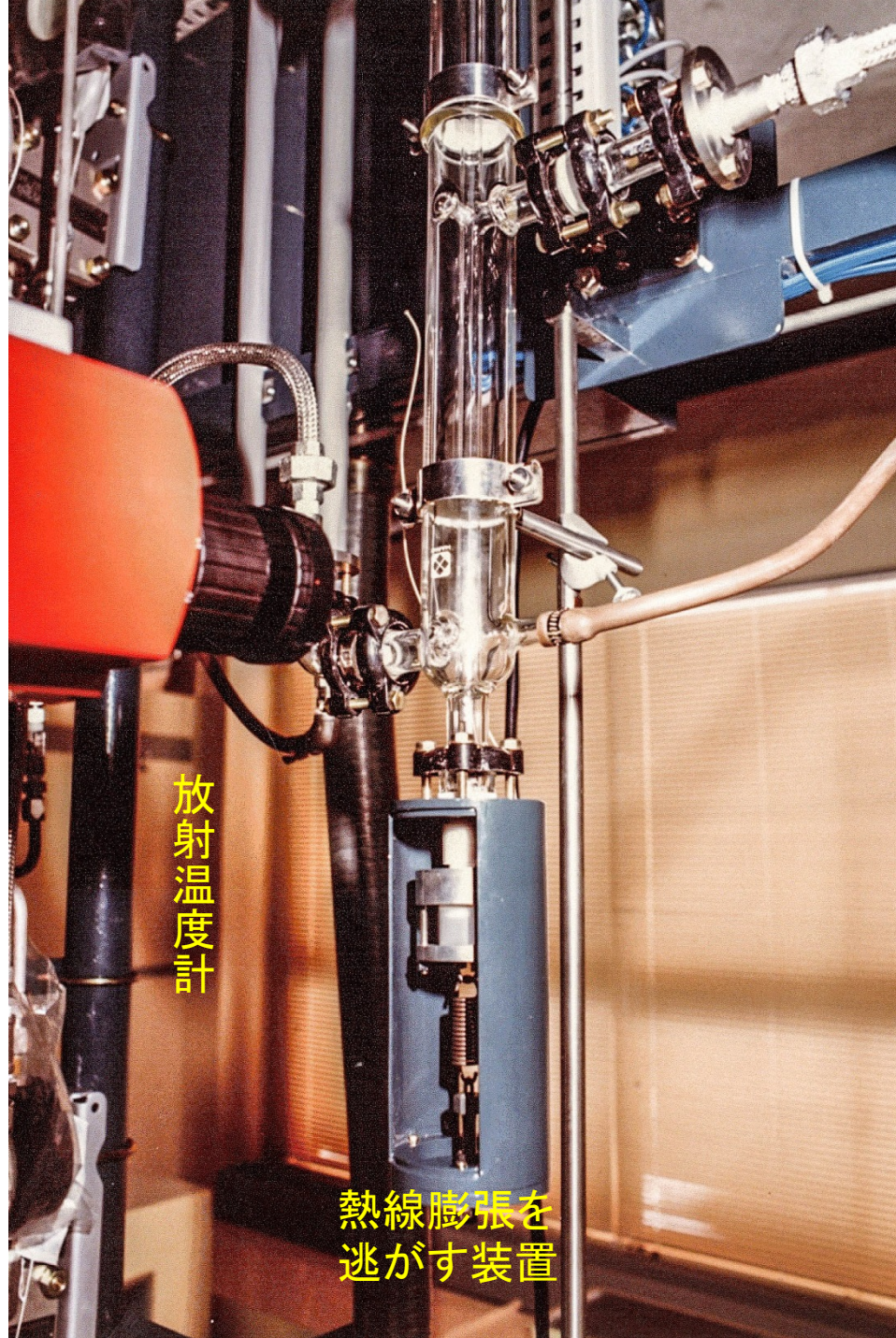


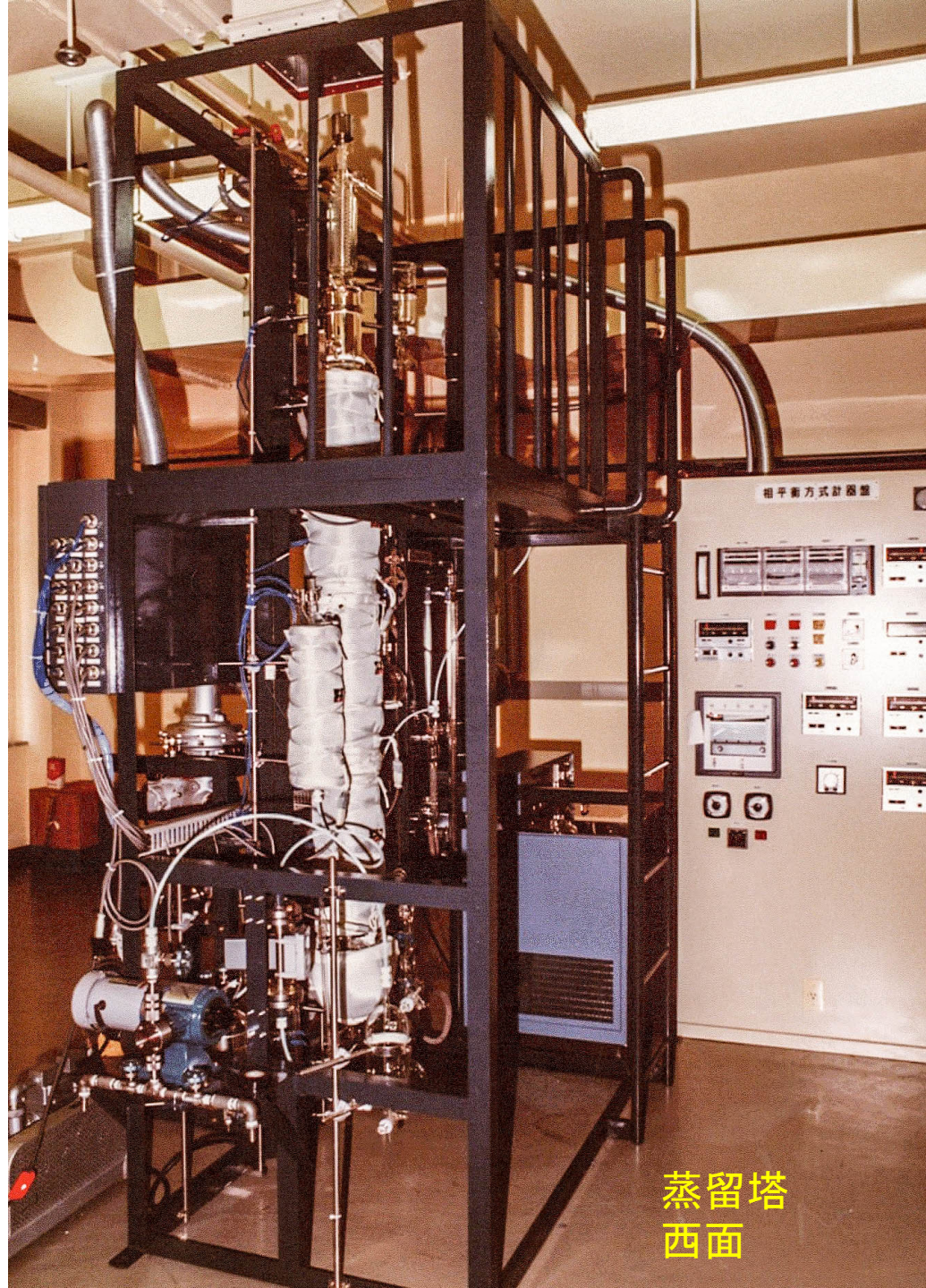




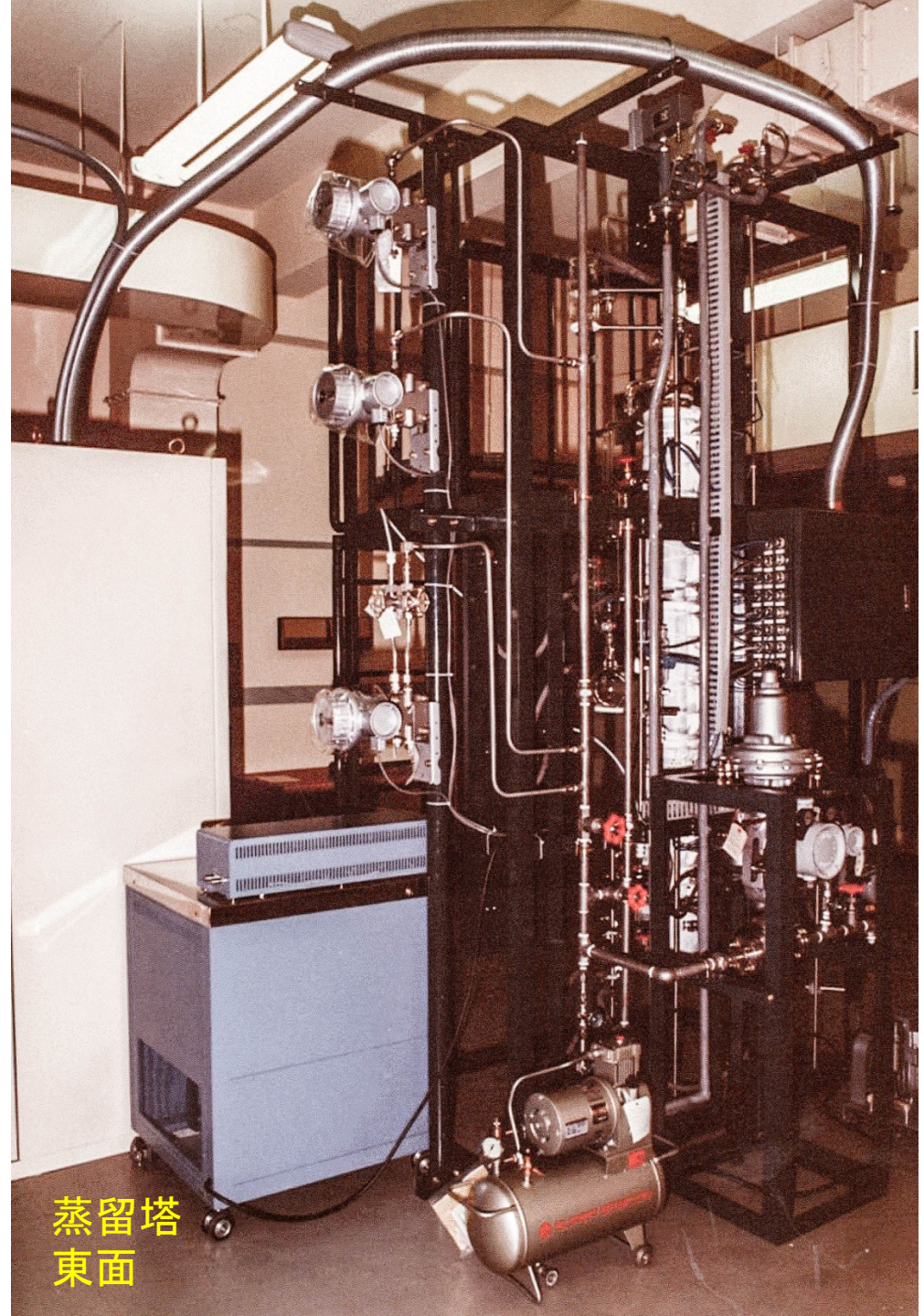
オイルレス真空ポンプ

質量流量計

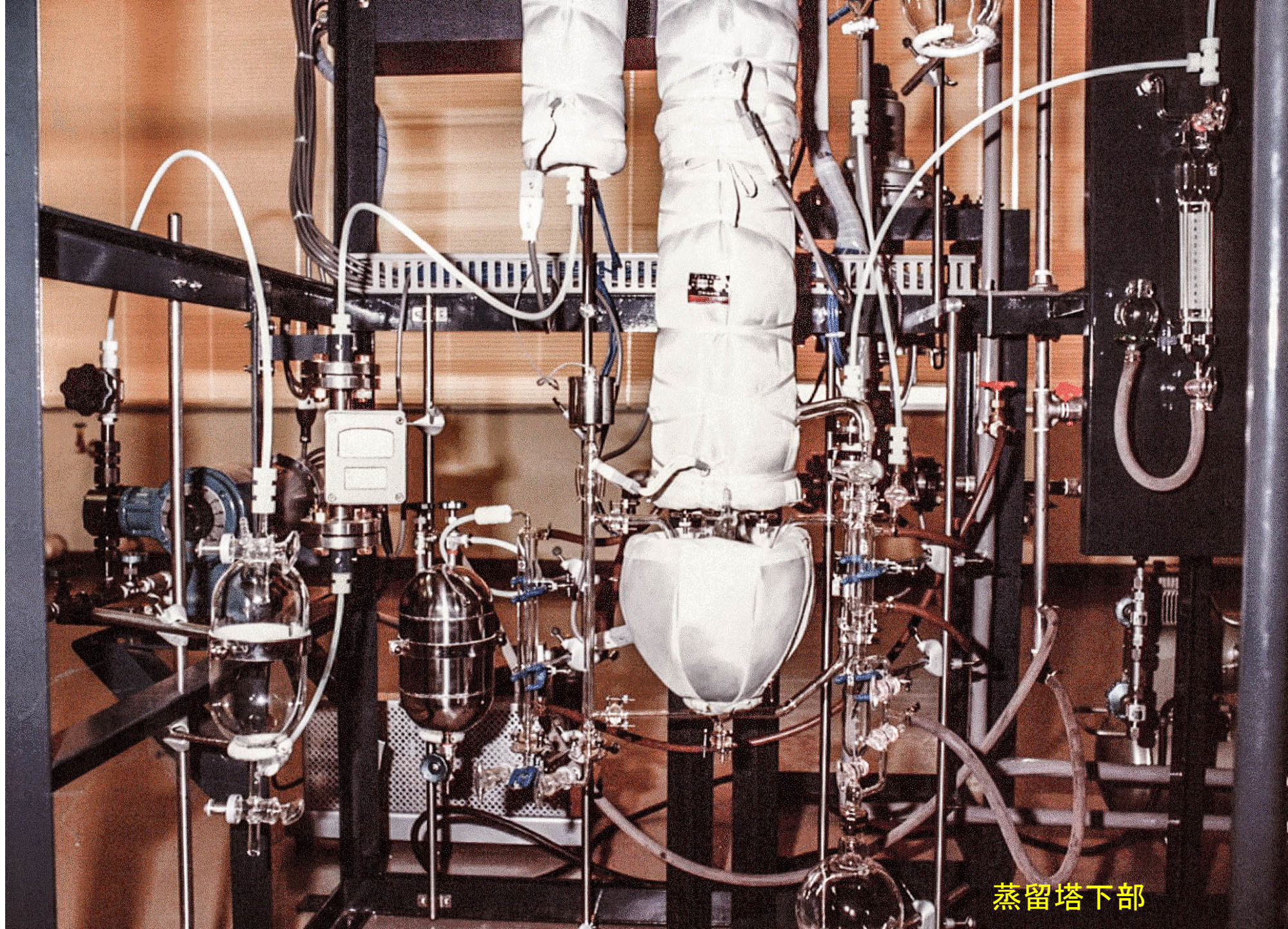




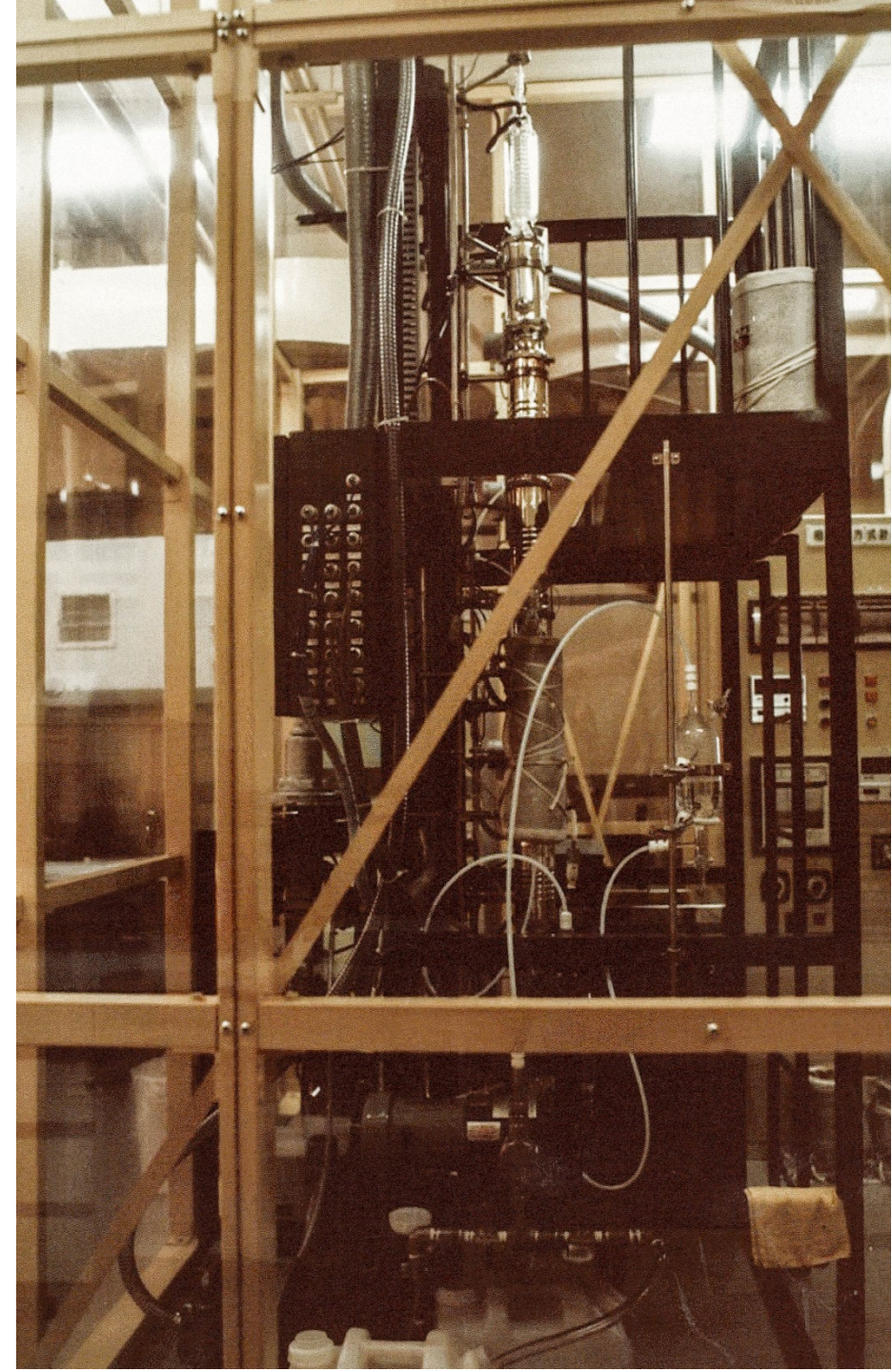
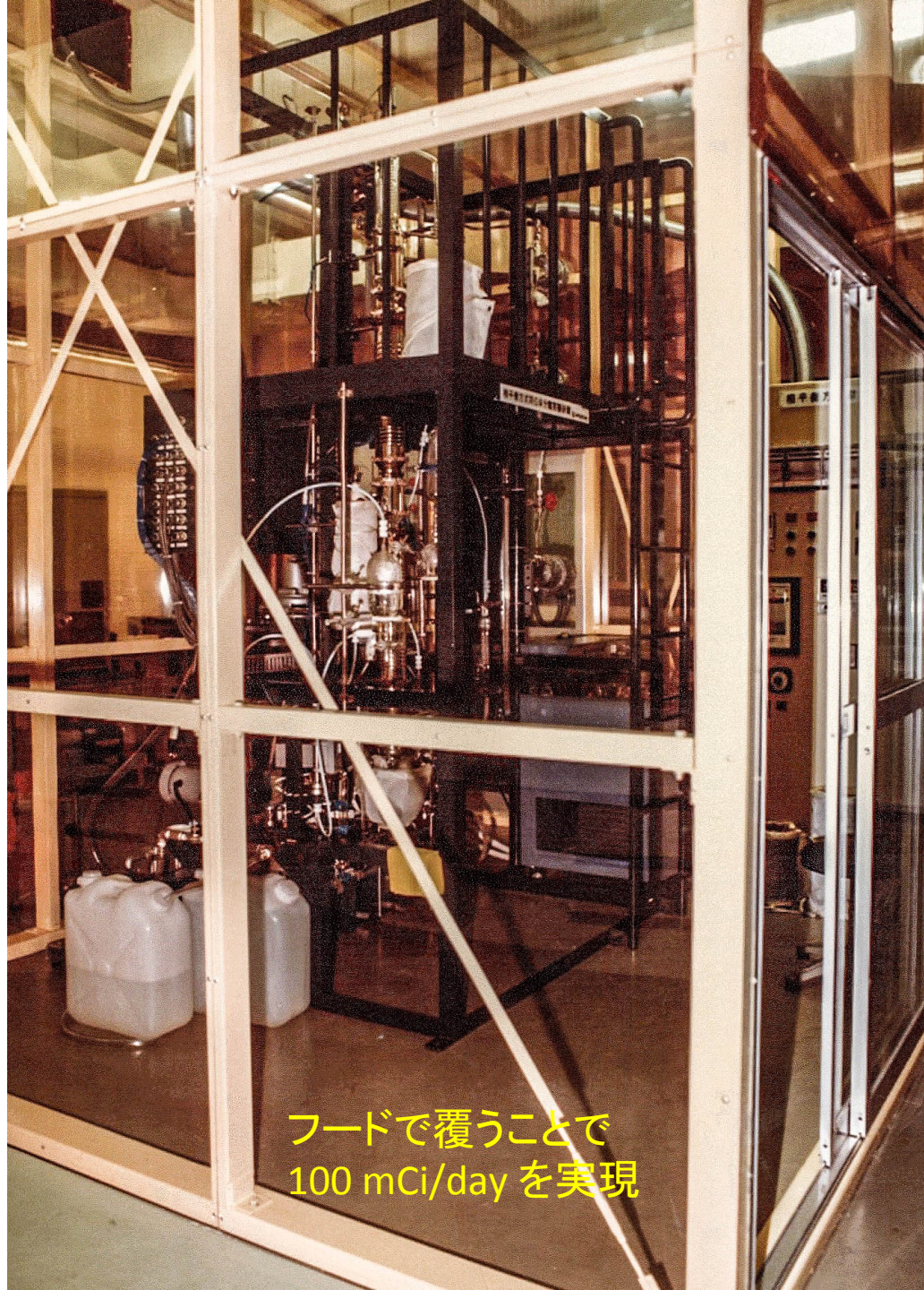
蒸留塔
西面

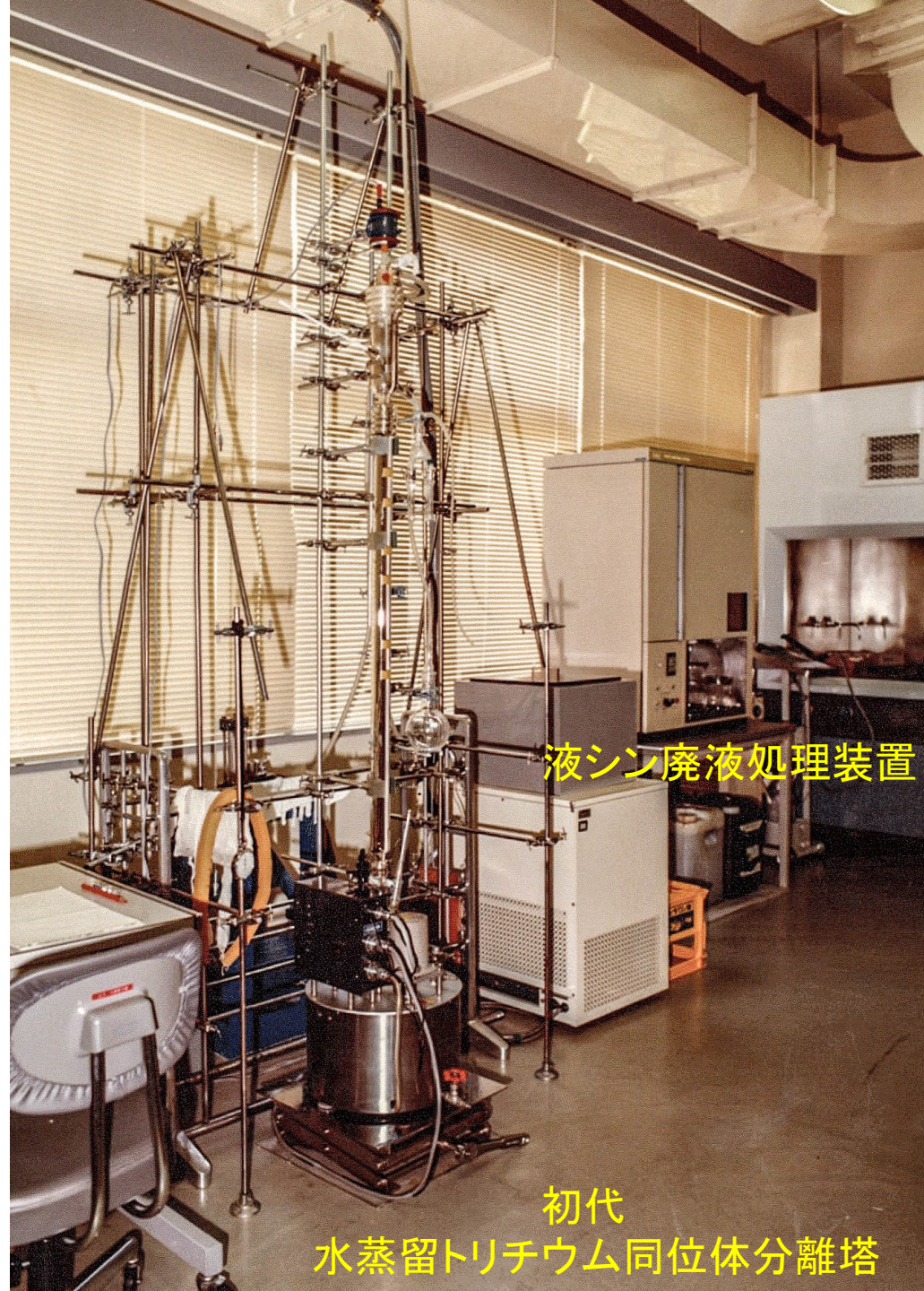


蒸留塔
東面



蒸馏塔下部





液シン廃液処理装置

初代
水蒸留トリチウム同位体分離塔



Aloka LSC-602



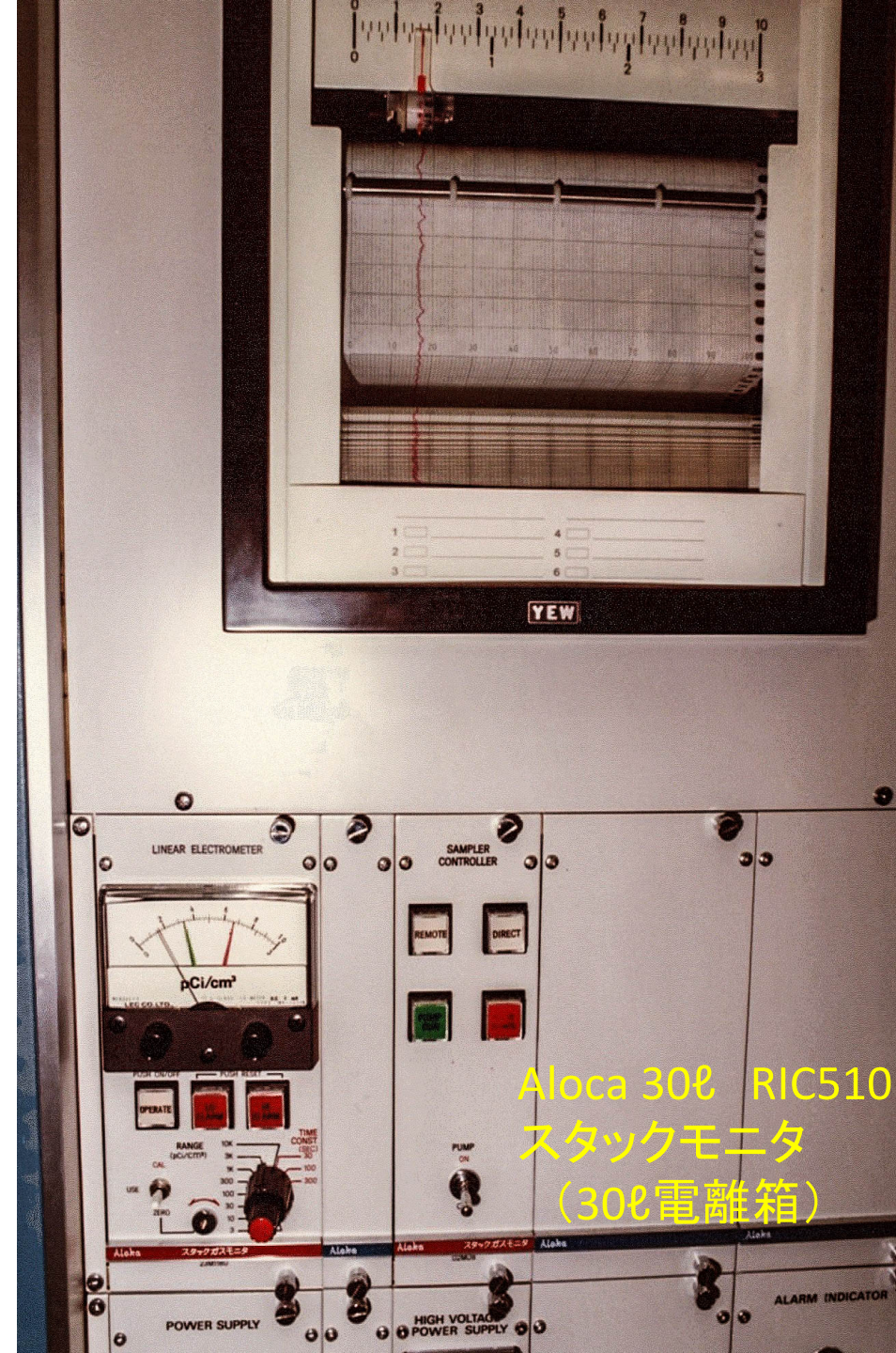
HITACHI M80 GC-MS 二重収束質量分析計



カスケード解析装置
HITACHI E800 スーパーミニコンピュータ



HITAC 10II データロガー



Aloc 30e RIC510
スタックモニタ
(30e電離箱)

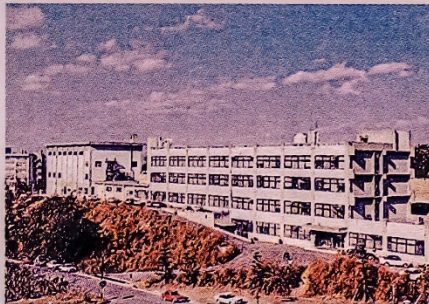
名古屋大学工学部
原子核工学教室

三十年誌

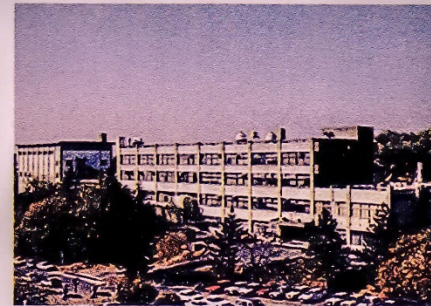
1996年10月



現在の教室建屋
(1996.9)



20年前

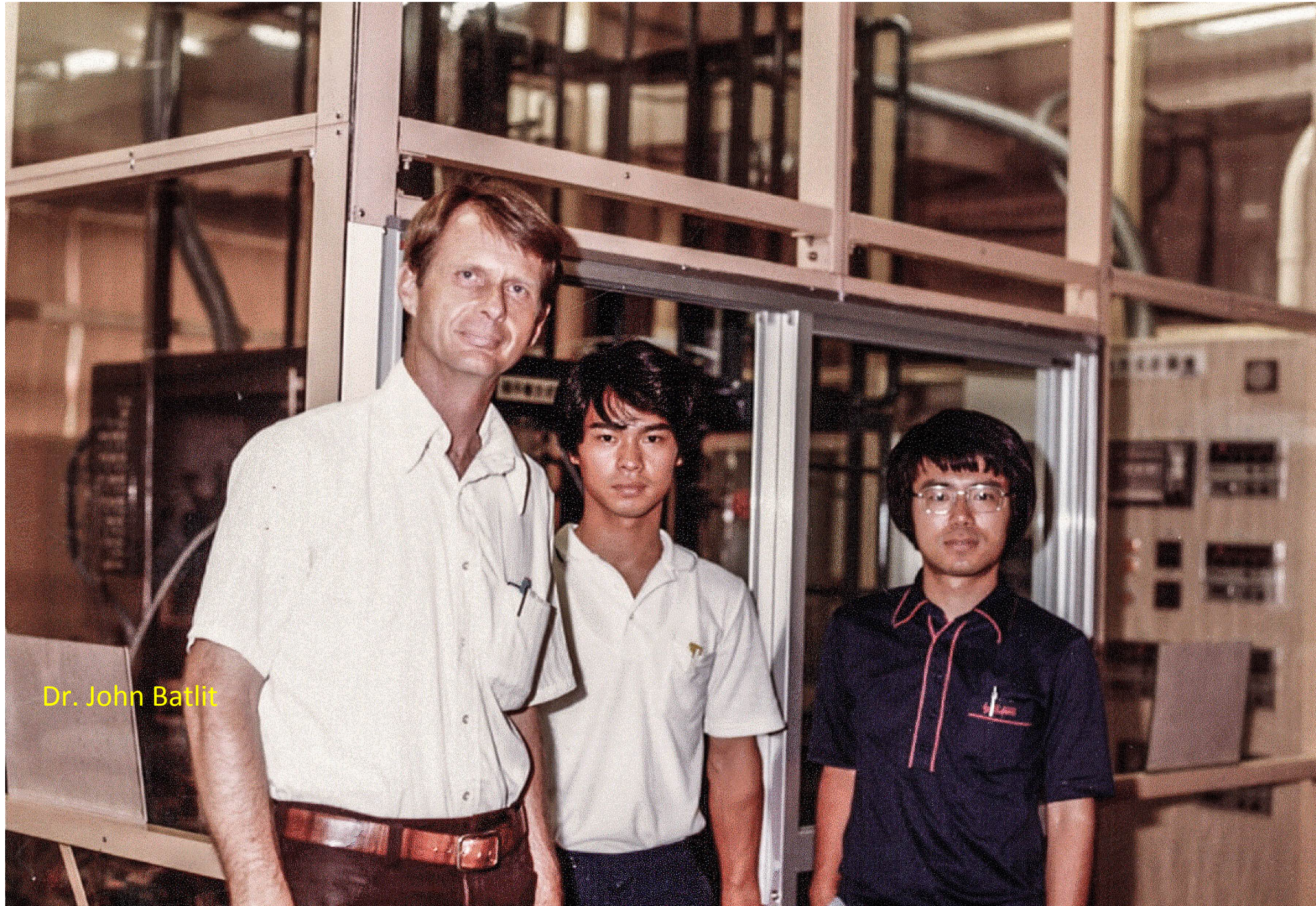


10年前

工学部6号館最東端1Fに
同位体分離実験室設置

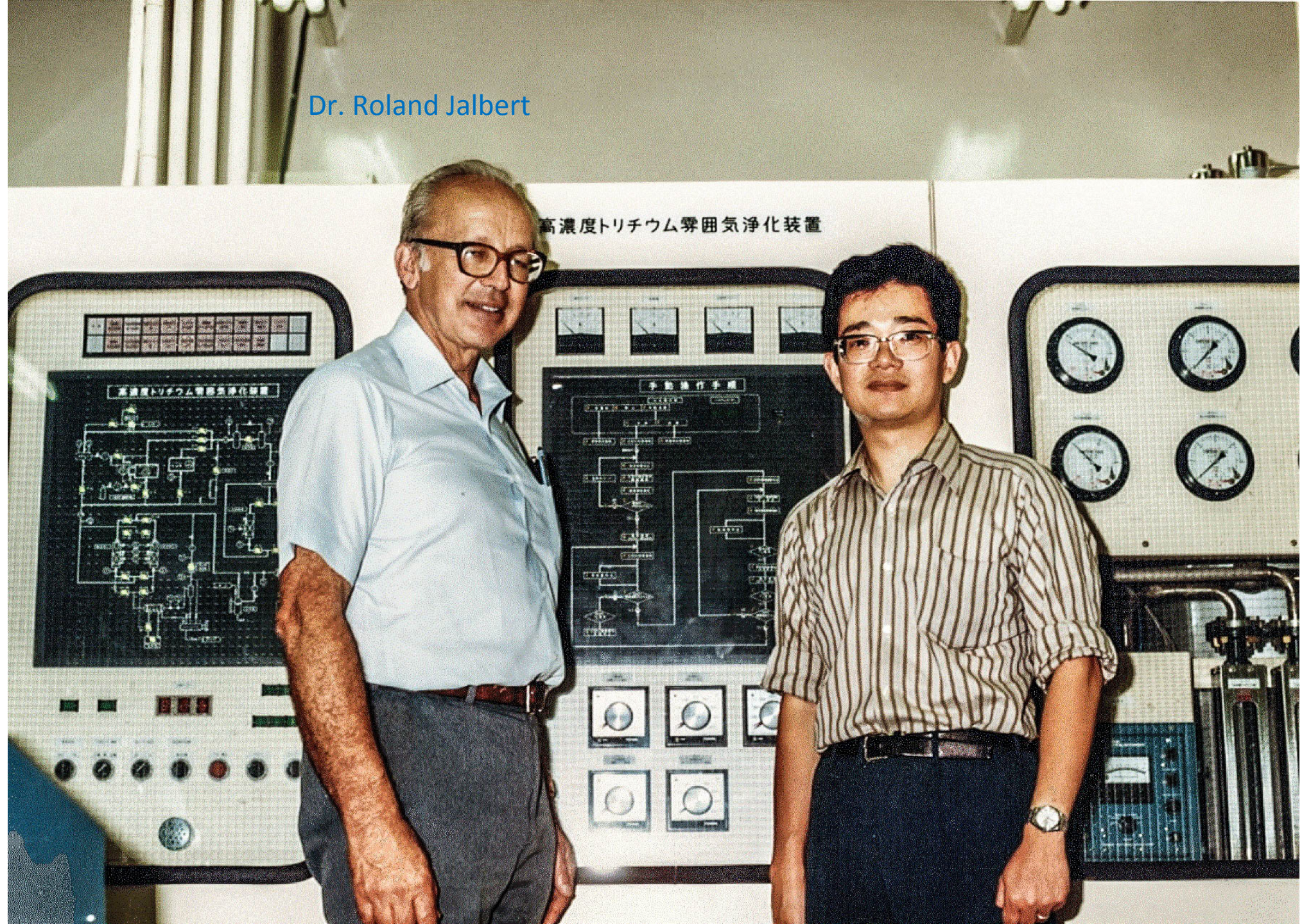
1986年春

工学部6号館最東端は地階のみ



Dr. John Batlit

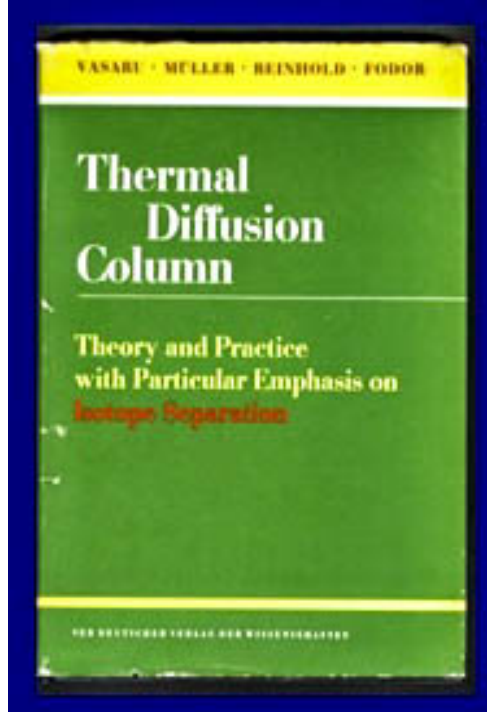
Dr. Roland Jalbert





Gh.Vasaru

A.Kanagawa



For Dr. Yamamoto
with compliments

Levi

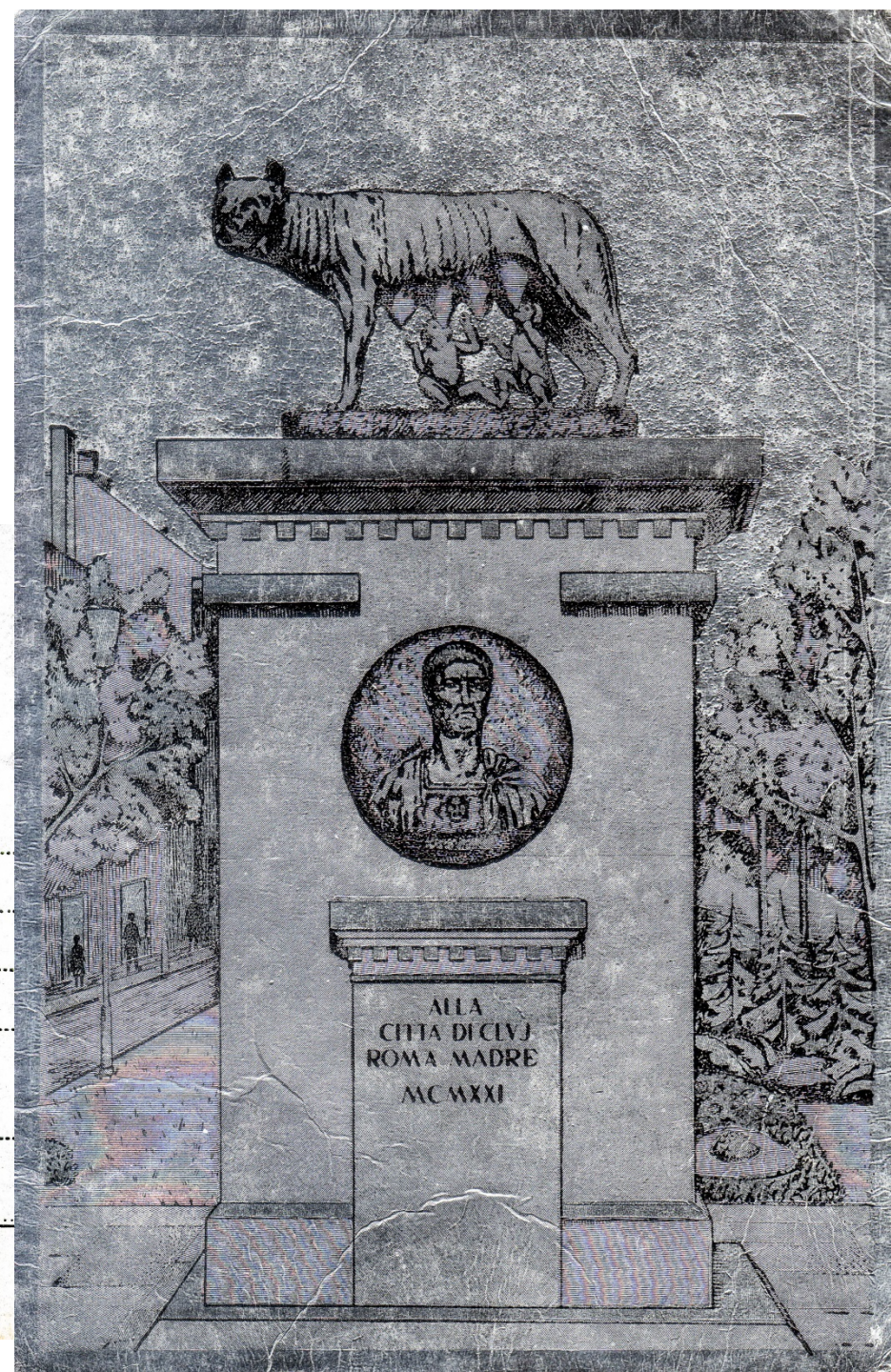
Oct 8, 1981

C.C.B.

CLUJ-NAPOCA — Lupa Capitolina

Cd. 10017 N.I. 11389/75

Lei 1,60



熱拡散塔分離性能開発手法の開発

- 熱拡散塔軸方向1次元濃度分布解析(Jones-Furry 理論)プログラム作成('74)
- 熱拡散塔軸対称内部2次元流れ解析('81,掲載'85,86)
- 熱拡散塔軸対称内部2次元濃度分布解析('83,掲載'87)
世界で初めて成功 (信じてもらえず分離実験結果と比較してから発表)
- 熱拡散塔簡単化モデル(軸方向1次元濃度分布)開発
Jones-Furry 理論の解析的不可能部分を回避するため
熱拡散塔の分離係数を, 代表平均温度の概念('84,掲載'87)を用いて,
塔の形状(塔高さ, 塔径, 熱線径, 供給・抜き出し位置etc),
運転条件(分離対象気体, 運転圧力, 供給流量, カットetc)の
パラメータで明示的に表現('84,掲載'90)
- 流れ場と拡散問題の統合: 物性値の大きく異なる混合物の分離問題への適用
- 多成分分離: 2分子気体混合物の熱線表面での平衡移行
- 熱拡散塔下部における渦の生成と振動の解明(運転圧力の上限)

A.3 2次元詳細分離性能解析

A.3.1 流れ場解析と濃度分布解析

連続方程式

$$\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r}(\rho r v_r) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho v_z) = 0.$$

運動方程式, r -成分

$$\begin{aligned} & \rho(v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z}) + \frac{R}{M} \frac{\partial}{\partial r}(\rho T) \\ & - (\mu_0 + \mu_1 T) \left(\frac{4}{3} \frac{\partial^2 v_r}{\partial r^2} + \frac{4}{3r} \frac{\partial v_r}{\partial r} - \frac{4v_r}{3r^2} + \frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2} + \frac{1}{3} \frac{\partial^2 v_z}{\partial r \partial z} \right) \\ & - \mu_1 \left\{ \frac{\partial T}{\partial r} \left(\frac{4}{3} \frac{\partial v_r}{\partial r} - \frac{2v_r}{3r} - \frac{2}{3} \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) + \frac{\partial T}{\partial z} \left(\frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) \right\} = 0. \end{aligned}$$

運動方程式, z -成分

$$\begin{aligned} & \rho(v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z}) + \frac{R}{M} \frac{\partial}{\partial z}(\rho T) \\ & - (\mu_0 + \mu_1 T) \left(\frac{\partial^2 v_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{4}{3} \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} + \frac{1}{3r} \frac{\partial^2 v_r}{\partial r \partial z} \right) \\ & - \mu_1 \left\{ \frac{\partial T}{\partial r} \left(\frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) + \frac{\partial T}{\partial z} \left(\frac{4}{3} \frac{\partial v_z}{\partial z} - \frac{2v_r}{3r} - \frac{2}{3} \frac{\partial v_r}{\partial r} \right) \right\} + \rho g = 0. \end{aligned}$$

エネルギー方程式

$$\begin{aligned} & \rho \hat{C}_v (v_r \frac{\partial T}{\partial r} + v_z \frac{\partial T}{\partial z}) - (k_0 + k_1 T) \left(\frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \\ & - k_1 \left\{ \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)^2 \right\} + \frac{R}{M} (\rho T) \left(\frac{v_r}{r} + \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = 0. \end{aligned}$$

解析の仮定

1. 理想気体でNewton流体.
2. 粘性係数 μ , 熱伝導係数 k は温度 T の一次関数.
3. 熱線表面(半径 r_h): T_h K, 冷壁表面(r_c): T_c K. **境界温度固定**
4. 温度場, 流れ場は軸対称.
5. 粘性散逸は無視.
6. 組成平均の密度は, 組成に因って不変. これは,
 - (a) 質量差の小さい同位体混合物.
 - (b) 片方の成分が極く僅か.

の時に成立.

分離困難な方が解析は容易

数値解法

1. Control volume approach.

物質収支を高精度に満足

2. 2 次の精度の中央差分.

3. Newton 反復, Gauss の直接消去.

このプログラミングが困難を極めた

数値解法の工夫

1. 基準温度分布の導入. 微係数の精度向上.

1 mm で100℃以上の温度勾配による析落ち回避

2. 塔全体の質量保存則の導入. 0 への収束回避.

このプログラミングが困難を極めた

3. Gauss 直接消去での Scaling, Partial pivoting.

流れ解析で得られた
 $\{\rho_{ij}, v_{r,ij}, v_{z,ij}, T_{ij}\}$ を
移流・拡散方程式に代
入して, Newton 法で
解く.

移流・拡散方程式

$$\begin{aligned} \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left[r \rho x_A v_r - r \rho \frac{M_B}{M} D_{AB} \left\{ \frac{\partial x_A}{\partial r} + \alpha_T x_A (1 - x_A) \frac{1}{T} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right\} \right] \\ + \frac{\partial}{\partial z} \left[\rho x_A v_z - \rho \frac{M_B}{M} D_{AB} \left\{ \frac{\partial x_A}{\partial z} + \alpha_T x_A (1 - x_A) \frac{1}{T} \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right\} \right] = 0. \end{aligned}$$

A.3.2 H₂-HT 分子間の α_T 概略評価 ('84, 掲載'88)

The Chapman-Cowling approximation

$$D_{AB} = \frac{0.002680}{P(\text{in atm.})\sigma_{AB}^2} \sqrt{T^3 \frac{M_A + M_B}{2M_A M_B}} \cdot \frac{f_d}{\Omega^{(1,1)*}}.$$

The Monchick-Sandler-Mason scheme + 粗い近似

$$\alpha_T = (6C_{AB}^* - 5)_{inel} \cdot \frac{S_A x_A - S_B x_B}{Q_A x_A^2 + Q_B x_B^2 + Q_{AB} x_A x_B} + \frac{1}{5} [(6\tilde{C}_{AB} - 5) - (6\tilde{C}_{BA} - 5)],$$

 $C_{inel}^*, \tilde{C}_{AB}, \tilde{C}_{BA}$: 非弾性衝突積分の比 (-) $S_A, Q_A, Q_{AB} \text{ etc.}$: 種々の衝突積分の関数 (-)熱拡散定数CC近似では
水素同位体分離予測不可 σ_{AB} : A-B 衝突直径 (Å) f_d : 1次から高次近似
への補正係数 (-) $\Omega^{(1,1)*}$: 無次元衝突積分,
 T と ϵ/k の関数 ϵ/k : 分子間ポテンシャル深さ (K)
(k: the Boltzmann 定数)HT-H₂ 混合気体 (A: HT, B: H₂) σ_{AB} : 3.06 Å, ϵ/k 30.4 K

Lennard-Jones(9-6) potential.

 $x_{HT} \simeq 0$ の時の近似式

$$\alpha_T = [(6C_{AB}^* - 5)_{el} - 0.0968](-S_B/Q_B) - 0.0484 \simeq 0.0945 - 0.16337 \cdot \exp(-0.01024 \cdot T).$$

A.3.3 計算機性能への要求事項

Newton 法で要求する計算機記憶領域

n :	変数の数.	ヤコビ行列サイズ :	$(n \times N_R \times N_Z)^2$
N_R :	半径方向分割数.	主記憶最低必要量 :	$6n^2 N_R^2$
N_Z :	軸方向分割数.	外部記憶最低必要量 :	$n^2 N_R^2 (3N_Z - 2)$
		$N_R < N_Z$, 単精度:× 4B, 倍精度:8B,4 倍精度:16B.	

Newton 法反復 1 回当り計算に要する時間

メッシュ	流れ場	濃度分布	計算機 (精度)
(14×40)	18 s	—	FACOM M200(D)
(14×60)	26.7 s	—	
(24×60)	100.5 s	—	
(17×158)	~74 m	~3 m	HITAC E800/7(D)
(17×314)	~144 m	~6 m	
(17×158)	~63 s	~1.6 s	FACOM M780/20(Q)
(17×314)	~130 s	~3 s	
(24×314)	~390 s	(~10 s)	

流れ場 5~7 回.

濃度場 2~4 回 で収束

YHP-9735 (40MFLOPS)

(17×158)mesh に対し

流れ場~55 s, 濃度場~1 s.

流れ場・濃度場連立 2 成分系~150 s.

流れ場・濃度場連立 3 成分系~245 s.

連立解法では 10~23 回で収束

A.4 1次元簡単化分離性能解析

熱拡散塔に対するJones-Furry-Onsager 理論と、
遠心分離機に対するCohen-Kanagawa 理論とは
手法は同じ

塔定数

軸方向 1 次元輸送方程式

Jones-Furry-Onsager理論

$$\tau_A = \tau + H \cdot x(1-x) - (K_c + K_d) \cdot \frac{dx}{dZ}.$$

τ : 分離すべき混合物の全輸送量,

τ_A : species A の輸送,

$x(Z)$: 半径方向に積分した species A の分率密度,

H : 熱拡散効果による流れに関する係数,

K_c : 対流による再混合に関する係数,

K_d : 拡散による再混合に関する係数.

$$H \equiv 2\pi \int_{r_h}^{r_c} \alpha_T \frac{\partial \ln T}{\partial r} \left(\int_{r_h}^r \rho v_z(r) dr \right) dr,$$

$$K_c \equiv 2\pi \int_{r_h}^{r_c} \frac{1}{\rho D r} \left(\int_{r_h}^r \rho v_z(r) dr \right)^2 dr,$$

$$K_d \equiv 2\pi \int_{r_h}^{r_c} \rho D r dr.$$

α_T : 熱拡散ファクタ, (-)

D : (通常) 拡散係数, (cm²/s)

ρ : 密度, (g/cm³)

$v_z(r)$: 軸方向速度分布. (cm/s)

Manhattan Project の際には、塔定数の計算のための膨大な数表が作成された

解析的に取扱不可能の理由

(1) $v_z(r)$ の陽表現がない. (2) 温度分布に対数を取ると
解析的積分不可能. (3) 繰り返し積分が複雑.

自然対流基本式 (定常, 軸対称)

$$0 = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) \right] + \rho g_z$$

$$\downarrow \quad dp/dz = -\bar{\rho}g$$

自然対流近似運動方程式

$$0 = \bar{\mu} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) \right] + \bar{\rho} \bar{\beta} g (T - \bar{T})$$

$\bar{T}$: 系を代表する温度,
 $\equiv$ 物性値を評価する温度.

β : 体積膨張率,
 $\equiv 1/T$ 理想気体.

r_c で無次元化 : $r^* \equiv r/r_c$ $\delta \equiv r_h/r_c$

境界条件 $v_z(\delta) = v_z(1) = 0$.

$$\theta^* F \rho_c = 2\pi \int_{r_h}^{r_c} \rho v_z(r) r dr.$$

温度分布 $T(r) = \frac{\Delta T}{\ln \delta} \cdot \ln r^* + T_c.$

Semi-explicit 速度分布

$$v_z(r^*) = \frac{\bar{\rho} \bar{\beta} g \Delta T \cdot r_c^2}{4 \bar{\mu} \ln \delta} \times \left[\underbrace{-\frac{I_2}{I_1} \cdot f_1 + f_2}_{\text{自然対流}} + \underbrace{\frac{2\theta^* F \bar{\mu}}{\pi r_c^4 \bar{\rho} g \bar{\beta} T_c} \cdot \frac{1}{I_1} \cdot f_1}_{\text{強制対流}} \right].$$

$$f_1(\delta, r^*) \equiv -(1 - r^{*2}) + \frac{1 - \delta^2}{\ln \delta} \ln r^*,$$

$$f_2(\delta, r^*) \equiv -(r^{*2} - \delta^2) \ln r^*,$$

$$I_1 \equiv \int_{\delta}^1 \frac{f_1 r^* dr^*}{\ln r^* + a},$$

$$I_2 \equiv \int_{\delta}^1 \frac{f_2 r^* dr^*}{\ln r^* + a},$$

$$a \equiv T_c \cdot \ln \delta / \Delta T,$$

代表平均温度

Reference Mean Temperature

$$\bar{T} = T_c \left[1 - \frac{\Delta T}{T_c} \frac{1}{\ln \delta} \left(1 + \frac{I_2}{I_1} \right) \right] + \frac{2\theta^* F \bar{\mu} \Delta T}{\ln \delta \pi r_c^4 \rho g \beta T_c} \cdot \frac{1}{I_1}.$$

無次元輸送方程式

$$0 = w(x - x_A) + \alpha_T H^* x(1 - x) - \left(BK_c^* + \frac{K_d^*}{B} \right) \frac{dx}{dZ^*}$$

無次元供給流量

$$w \equiv \frac{2\theta^* F \bar{\mu}}{\pi r_c^4 \rho c g} \cdot A^2,$$

物性値・幾何条件

$$B \equiv \frac{\rho c g r_c^3}{4 \bar{\mu} D \ln \delta} \cdot \frac{\Delta T}{T_c} / A^2.$$

$$\begin{aligned} \bar{T} &\simeq \bar{T}_0 = T_c \left[1 - \frac{\Delta T}{T_c} \cdot \frac{1}{\ln \delta} \left(1 + \frac{I_2}{I_1} \right) \right] \\ &\simeq T_c \left[1 - \frac{\Delta T}{T_c} \cdot \frac{4 + 3 \ln \delta}{4 \ln \delta (1 + \ln \delta)} \right] \equiv T_c \cdot A, \\ A &\equiv \left[1 - \frac{\Delta T}{T_c} \cdot \frac{4 + 3 \ln \delta}{4 \ln \delta (1 + \ln \delta)} \right]. \end{aligned}$$

平均密度から決まる温度との関係

$$\bar{T} = \langle T \rangle \left[1 - \frac{\Delta T}{T_c} \frac{1}{2 \ln \delta} \left(1 + 2 \frac{I_2}{I_1} \right) \right].$$

塔定数

$$\begin{aligned} H^* &\equiv \int_{\delta}^1 \frac{1}{r(\ln r + a)} \left(\int_{\delta}^r \frac{u^* r dr}{\ln r + a} \right) dr, \\ K_c^* &\equiv \int_{\delta}^1 \frac{\ln r + a}{r} \left(\int_{\delta}^r \frac{u^* r dr}{\ln r + a} \right)^2 dr, \\ K_d^* &\equiv \int_{\delta}^1 \frac{r dr}{\ln r + a}, \end{aligned}$$

無次元速度

$$u^* \equiv w \cdot \frac{f_1(r)}{I_1} - \frac{I_2}{I_1} \cdot f_1(r) + f_2(r).$$

熱拡散塔の幾何条件, 運転条件の値で
明示的に表現された 無次元塔定数

$$H^* \simeq \left[-\frac{1}{64} \left(\frac{\Delta T}{T_c} \right)^2 \frac{1}{(\ln \delta)^2} \cdot \frac{2 + \ln \delta}{1 + \ln \delta} / A^2 \right] \\ + \left[\frac{1}{4} \left(\frac{\Delta T}{T_c} \right) \frac{3 \ln \delta + 4}{\ln \delta (1 + \ln \delta)} / A \right] \cdot w,$$

$$K_c^* \simeq \left[\frac{1}{16^3 \cdot 27} \cdot \frac{\Delta T}{T_c} \cdot \frac{1}{\ln \delta} \cdot \frac{15(\ln \delta)^2 + 56 \ln \delta + 53}{(1 + \ln \delta)^2} / A \right] \\ + \left[-\frac{39(\ln \delta)^2 + 121 \cdot \ln \delta + 94}{8 \times 16 \times 27 \cdot (1 + \ln \delta)^2} \right] \cdot w \\ + \left[\left(\frac{T_c}{\Delta T} \right) \frac{\ln \delta}{(1 + \ln \delta)^2} \left\{ \frac{11}{24} (\ln \delta)^2 + \frac{19}{18} (\ln \delta) + \frac{5}{8} \right\} \cdot A \right] \cdot w^2,$$

$$K_d^* \simeq \frac{\Delta T}{T_c} \cdot \frac{1}{2 \ln \delta} / A.$$

A.5 深冷壁熱拡散塔

熱拡散塔の運転圧力を上げていくと分離係数は増大し, ある最大値をとった後減少する

全還流・分離係数

$$\alpha\beta = \exp\left[\frac{\alpha_T \cdot H_0^*}{B \cdot K_{c0}^* + K_d^*/B} \cdot Z^*\right]$$

最適圧力 分離係数を最大にする圧力

$$\frac{\partial}{\partial P} \alpha\beta = 0 \text{ の解.}$$

圧力依存項

$$B = P^2 \cdot \frac{M g r_c^3}{4 \bar{\mu} D' R \ln \delta} \cdot \frac{\Delta T}{T_c^2} / A^2$$

$$\equiv P^2 \cdot B'$$

但し, $\rho_c = \frac{PM}{RT_c}$, $D' \equiv D_{st} \cdot P_{st}$ then, $D = D'/P$.

$$\frac{\partial}{\partial P} \frac{1}{P^2 B' \cdot K_{c0}^* + K_d^*/(P^2 B')} = 0$$

最適圧力 : $\bar{T} / \sqrt{r_c^3 \Delta T}$ に比例

$$P_{opt}^2 = \frac{1}{B'} \sqrt{\frac{K_d^*}{K_{c0}^*}}$$

Rutherford の実験結果をよく説明できる

$$= 384\sqrt{6} \cdot \frac{\mu D' R}{r_c^3 M g} \cdot \frac{T_c^2}{\Delta T} \left[1 - \frac{\Delta T}{T_c} \cdot \frac{4 + 3 \ln \delta}{4 \ln \delta (1 + \ln \delta)} \right]^2 \sqrt{\frac{(\ln \delta)^2 (1 + \ln \delta)^2}{15 (\ln \delta)^2 + 56 \ln \delta + 53}}.$$

最適圧力で得られる最大分離係数 : $\alpha_T \cdot (\Delta T / T_c A) \cdot Z^*$ に比例する引数

$$\begin{aligned} (\alpha\beta)_{P_{opt}}^{max} &= \exp \left\{ \alpha_T \cdot \frac{H_0^*}{2 \sqrt{K_{c0}^* \cdot K_d^*}} \cdot Z^* \right\} \\ &= \exp \left[\frac{\Delta T}{T_c} \cdot \frac{3\sqrt{6}(2 + \ln \delta) \cdot \alpha_T \cdot Z^*}{2 \cdot \ln \delta \sqrt{15 (\ln \delta)^2 + 56 \ln \delta + 53}} / \left\{ 1 - \frac{\Delta T}{T_c} \cdot \frac{4 + 3 \ln \delta}{4 \ln \delta (1 + \ln \delta)} \right\} \right]. \end{aligned}$$

ΔT の増加 $\longrightarrow \alpha\beta$ の増加

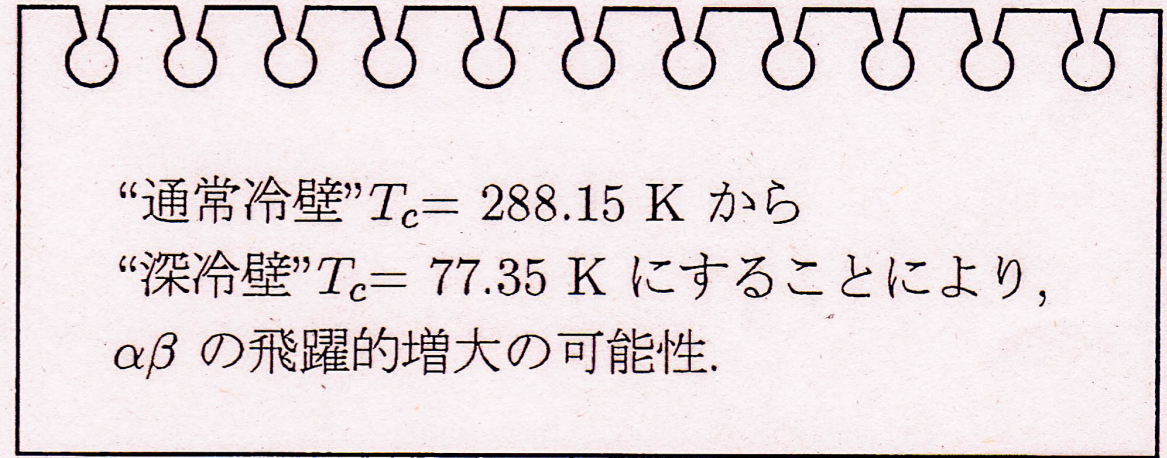
ΔT は, $(\alpha\beta)_{P_{opt}}^{max}$ の中では $\Delta T/T_c$ の形.



$\frac{\Delta T}{T_c}$ の増加 $\longrightarrow (\alpha\beta)$ の増加.

1988年11月

深冷壁熱拡散塔の概念着想



冷壁温度	α	β	$\alpha\beta$	P_{opt}
288.15 K	1.98	54.65	108.29	0.120 MPa
77.35 K	9.9914	1053.3	10520.46	0.038 MPa
2次元 詳細計算	$F = 1.0 \text{ cm}^3 \text{ (at 288.15 K, 0.1 MPa) / m}$. $\theta = 0.1$ (深冷壁). $\theta = 0.5$ (通常冷壁) .			

1990年8月 大型計算機センターへ移植 100万円/月突破

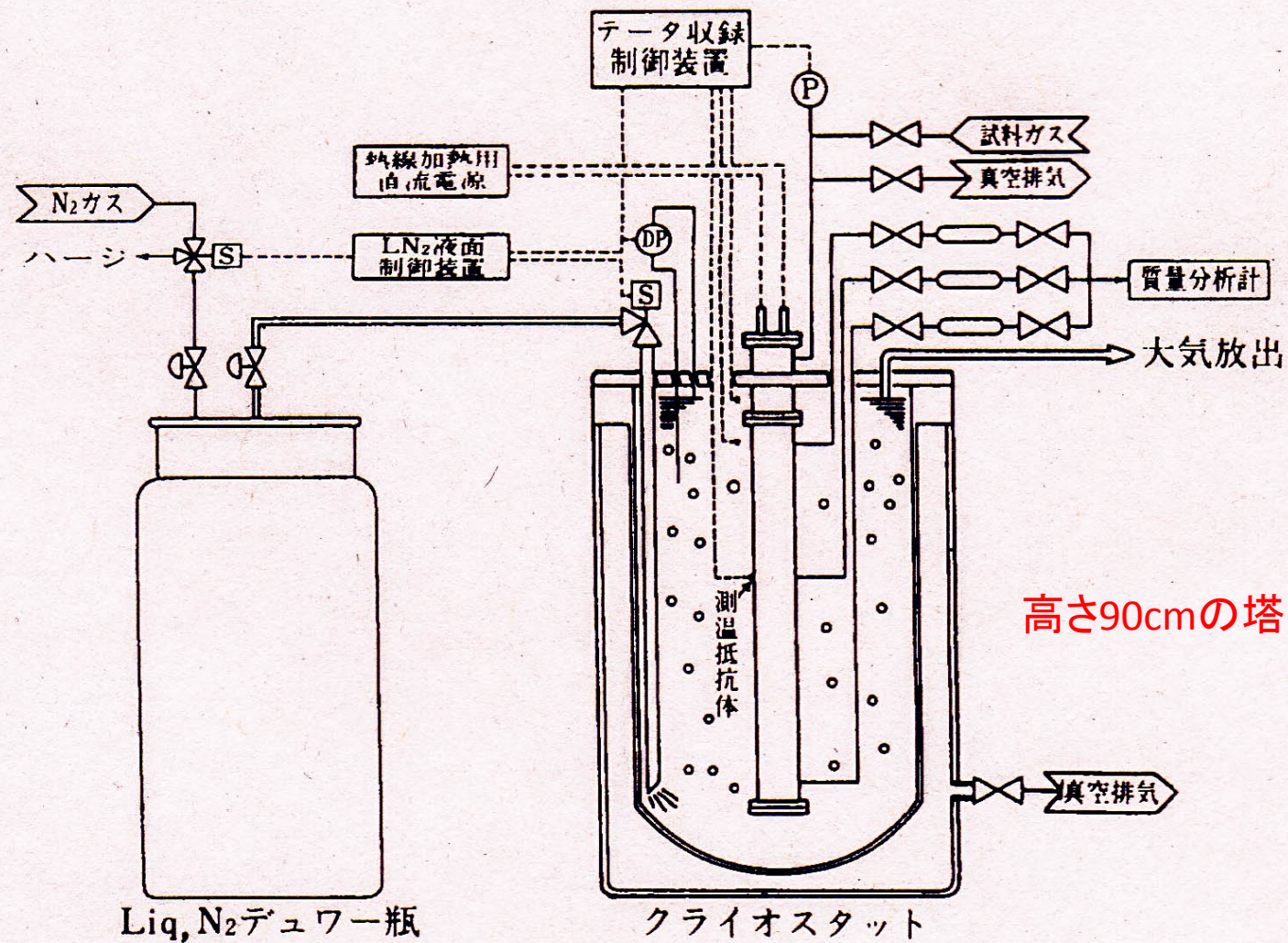


図1 深冷壁熱拡散塔予備実験装置

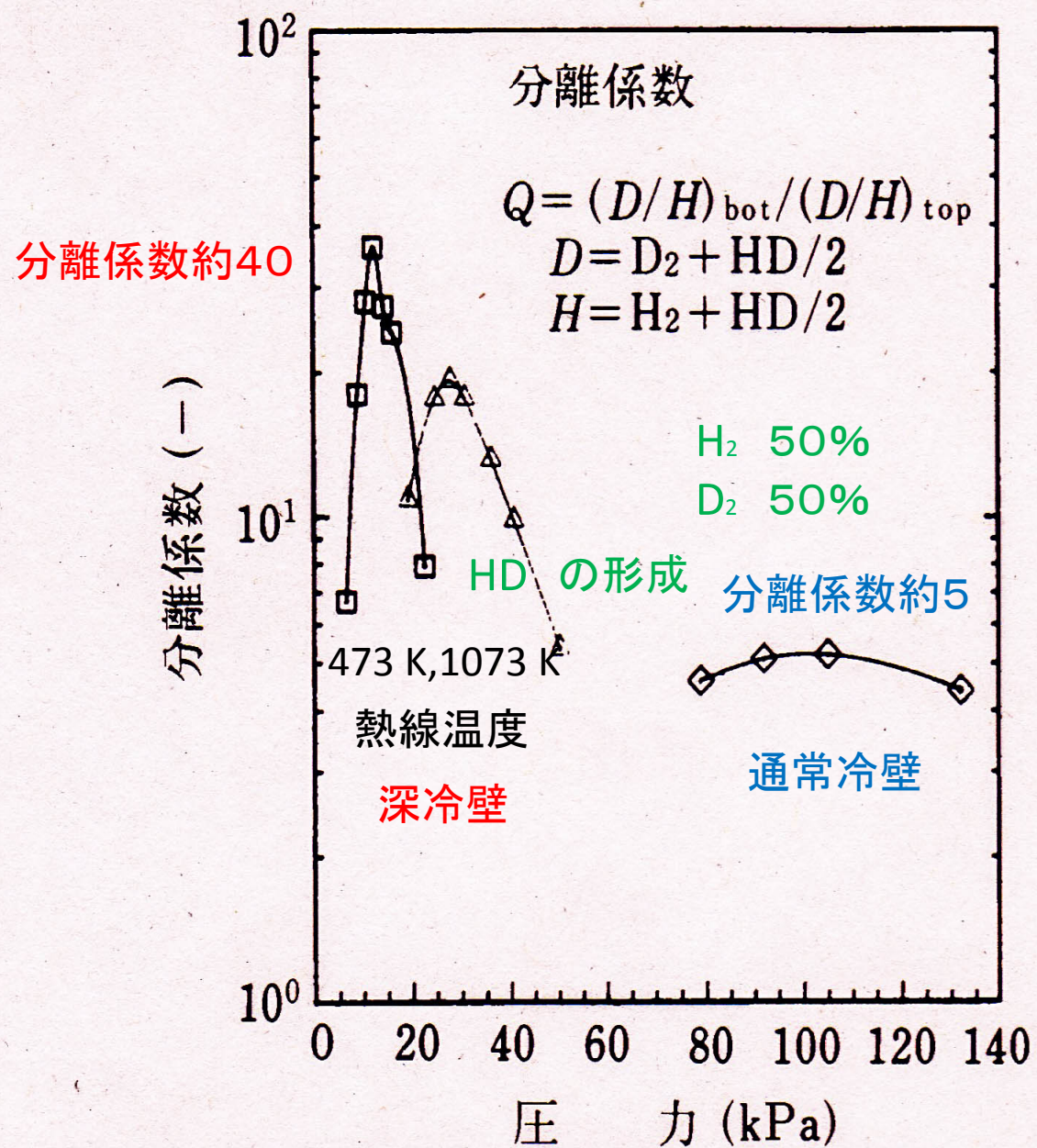
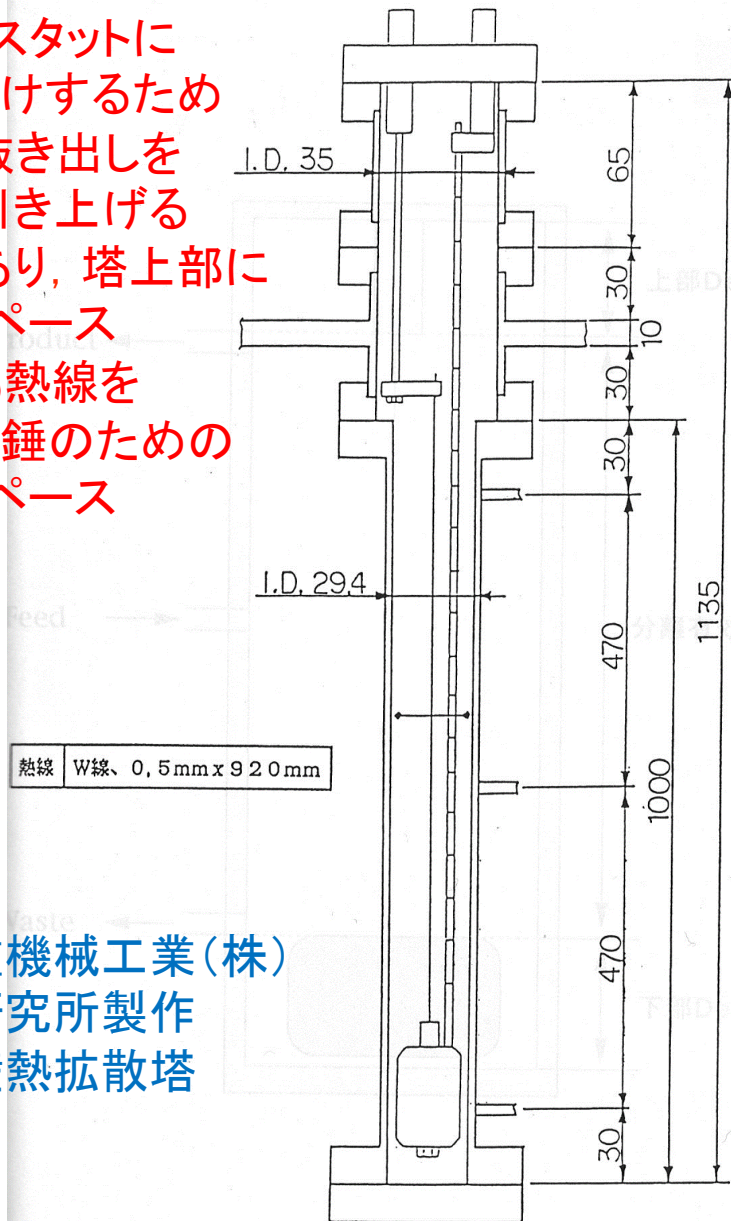


図2 深冷壁熱拡散塔予備実験結果

クライオスタットに
ジャボ漬けするため
塔下部抜き出しを
上部に引き上げる
必要があり、塔上部に
デッドスペース
下部にも熱線を
引っ張る錘のための
デッドスペース



住友重機械工業(株)
平塚研究所製作
深冷壁熱拡散塔

数値計算のためのモデル化

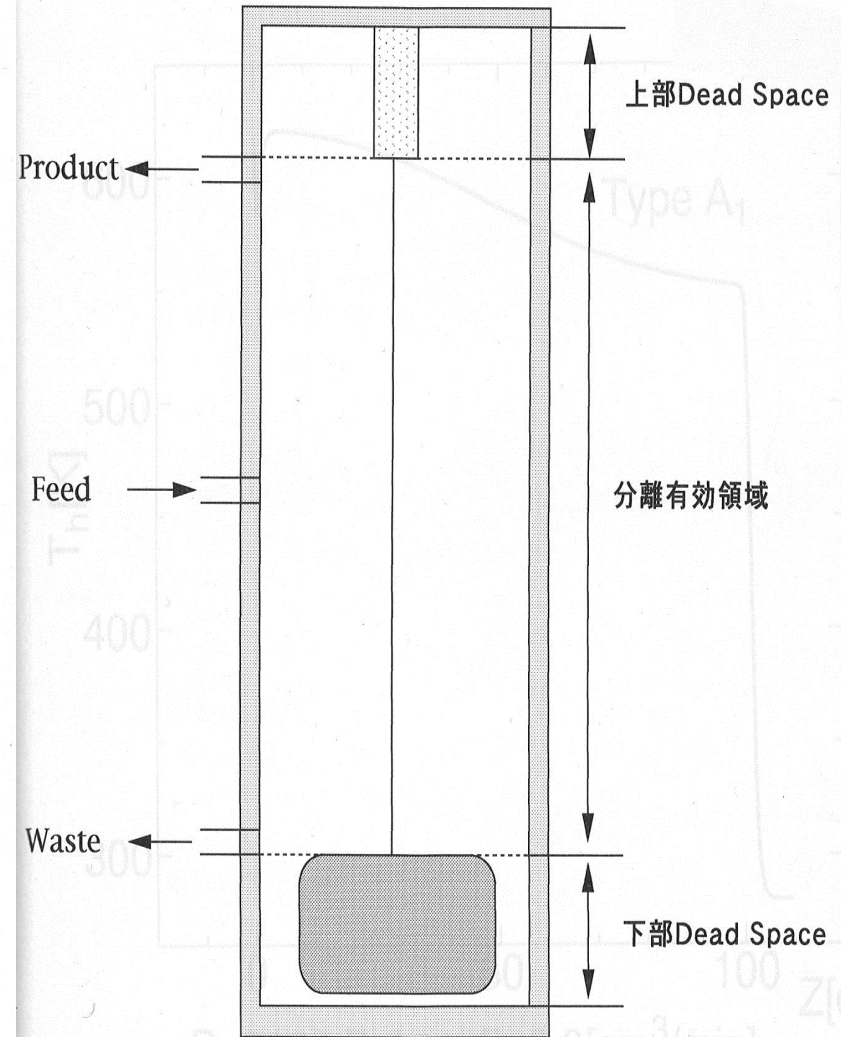
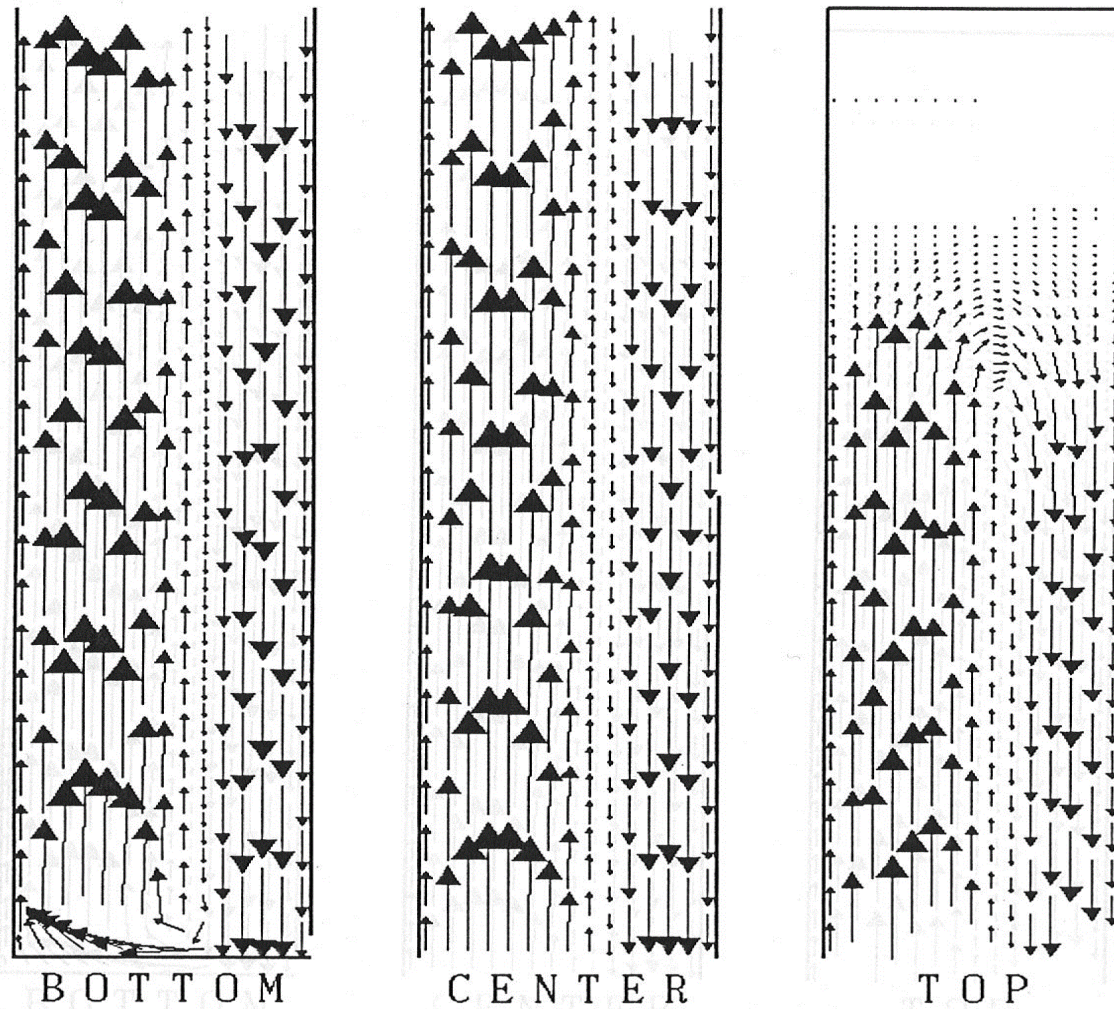


図 B.1: 住友重機械工業(株) 平塚研究所の深冷壁熱拡散塔

** FLOW PROFILE **
↑ 2.0 CM / SEC

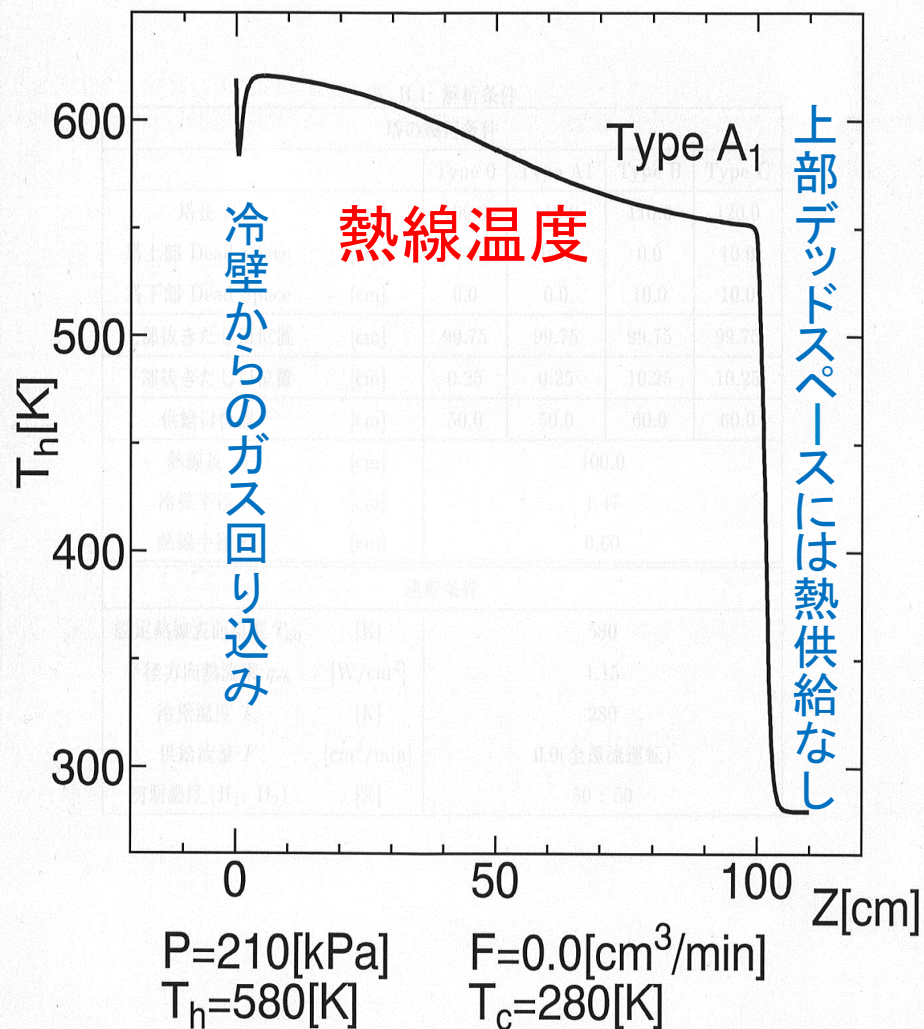


上部デッドスペースでは
流れが存在せず

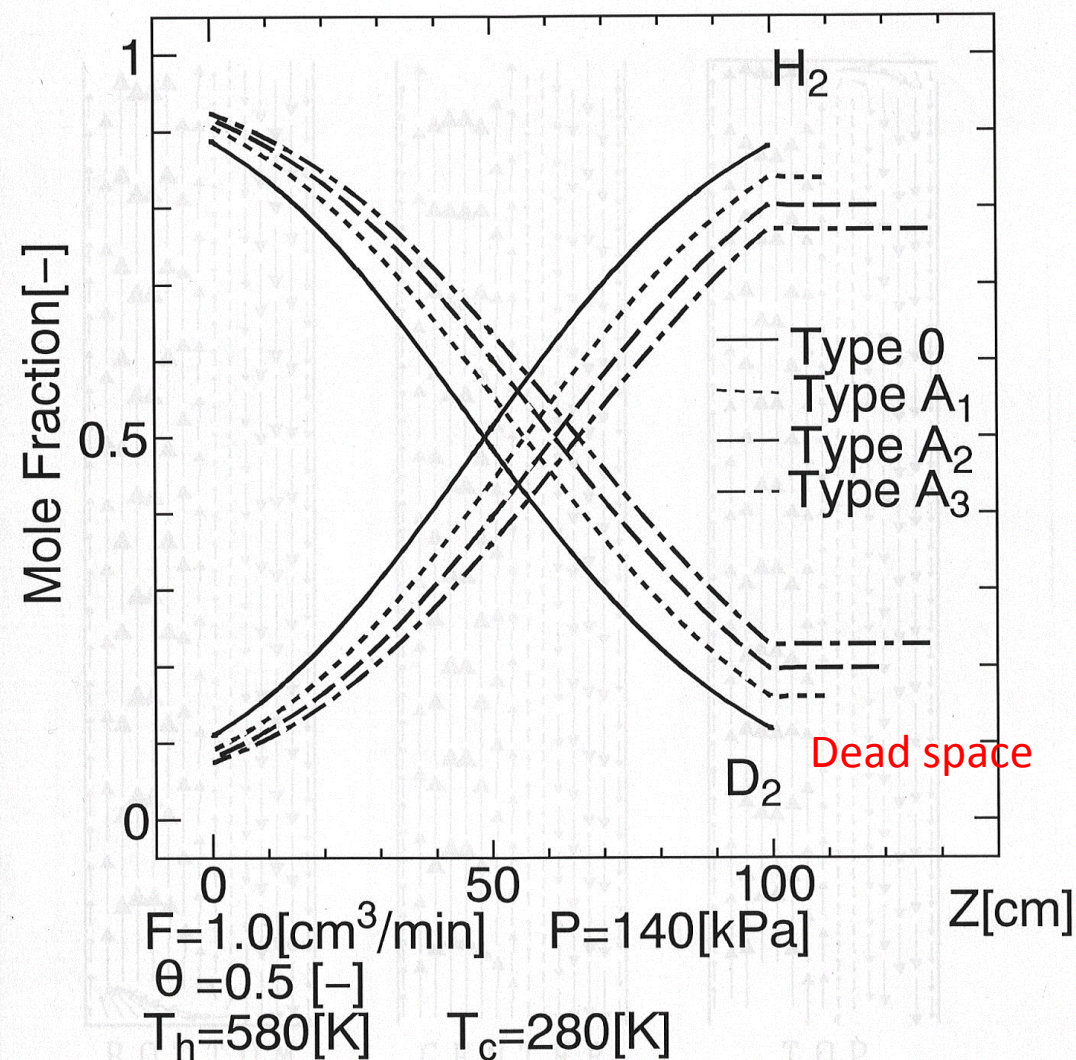
図 B.10: 210 kPa での上部 Dead Space(10cm) のある塔内流れ場

塔下部では
重水素濃縮
熱線温度上昇

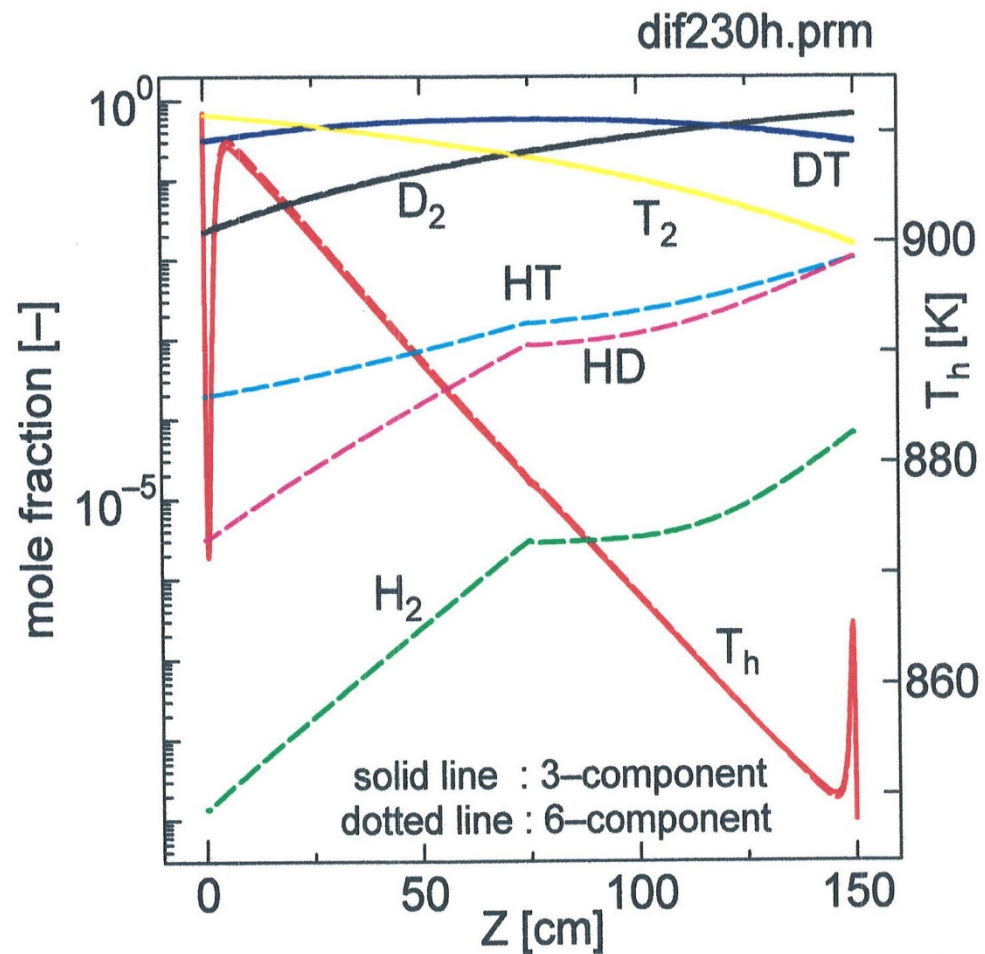
塔上部ほど
軽水素濃縮
熱線温度低下



上部デッドスペースの大きさによる
軽水素, 重水素組成分布の変化



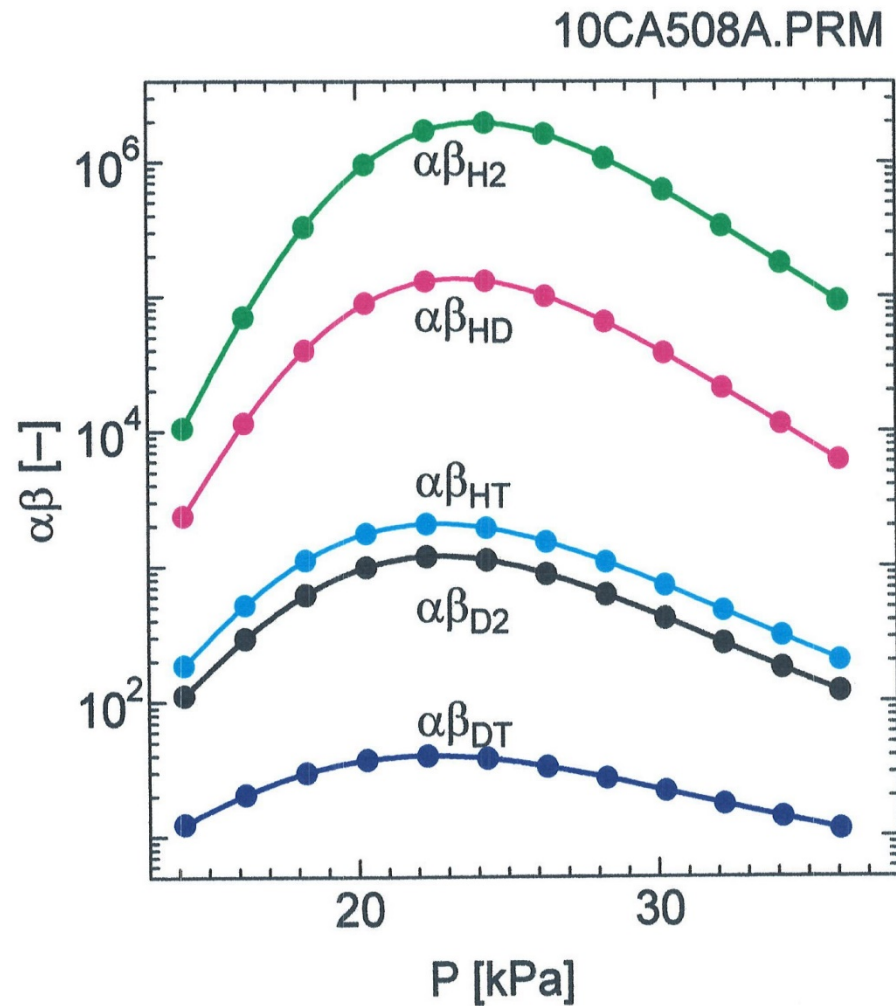
水素同位体分子6成分濃度分布



熱線表面同位体平衡移行あり

図 4.3: 3 成分系解析と 6 成分系解析との比較(軽水素成分トレーサ)

T_2 を基準成分とした分離係数



圧力依存性

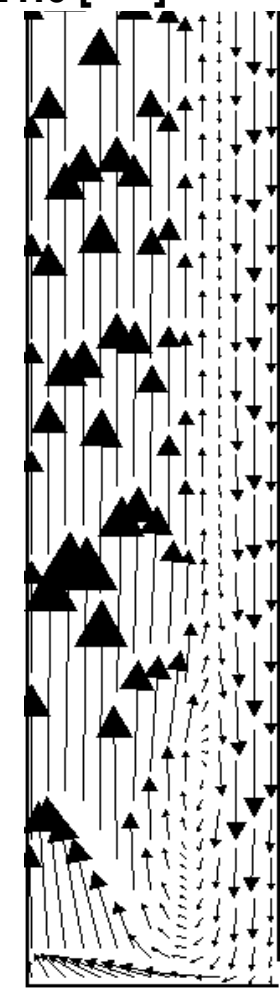
図 5.2: 塔内圧力に対する $\alpha\beta$ (case 2)

熱拡散塔の自然対流

- 自然対流の大きさは、運転圧力の上昇と共に大きくなる
- ある圧力で、塔の下部に渦を生じる(この時点まで層流定常解析が可能)
- 更に圧力が上がると、この渦が上下に震動を始める(定常解析は収束しなくなり、動的解析が必要となる)
- 渦が振動すると、その部分の気体が混合されるので、せっかく分離した成分が混合されることになり、分離の観点からは好ましくない

21.0 [cm]

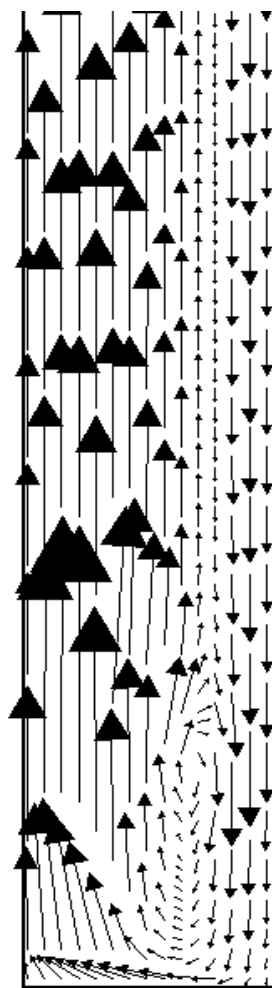
↑ 10.0 cm/s



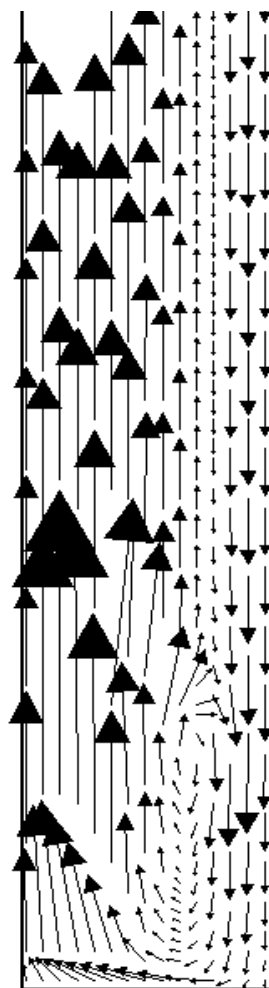
0.0

1.5 [cm]

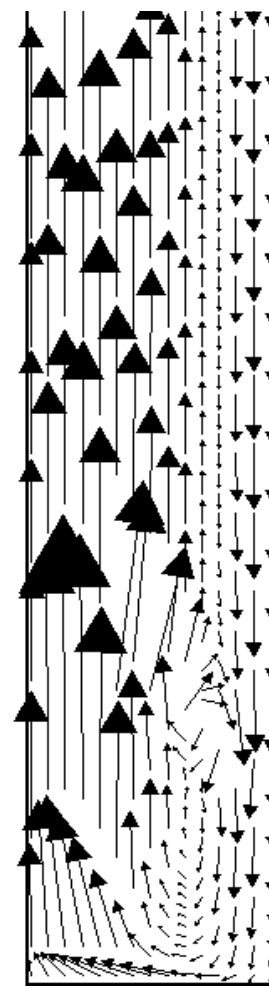
0.0 s



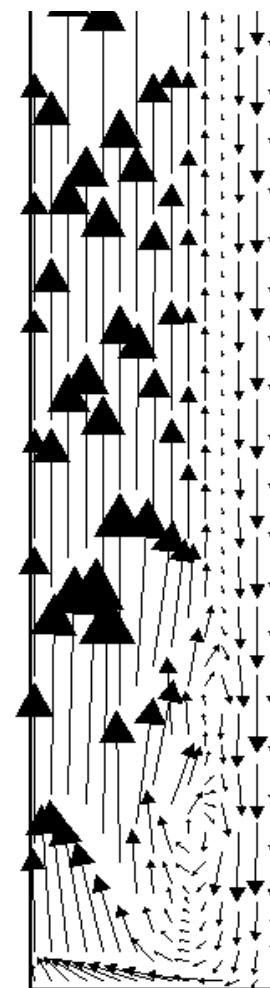
0.1 s



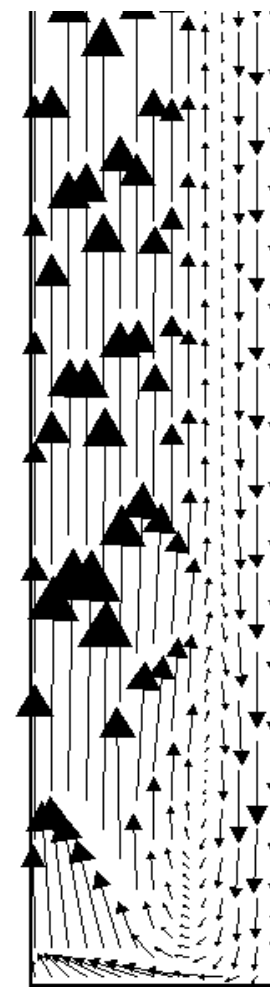
0.2 s



0.3 s



0.4 s



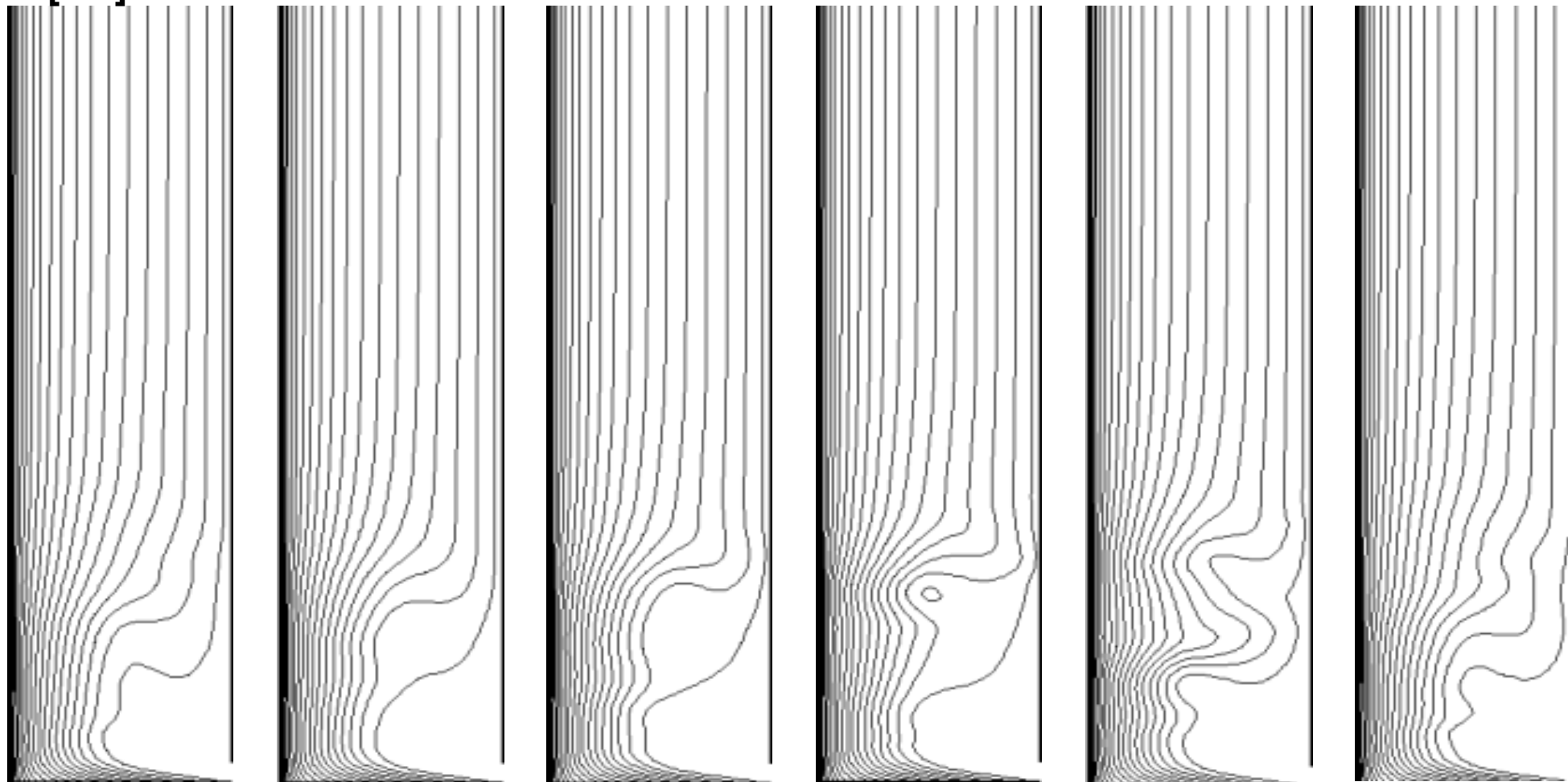
0.5 s

渦の振動

Hot wire 1277.35 K
Cold wall 77.35 K
Interval 60 .00 K

渦振動に伴う温度振動

21.0 [cm]



0.0

1.5 [cm]
0.0 s

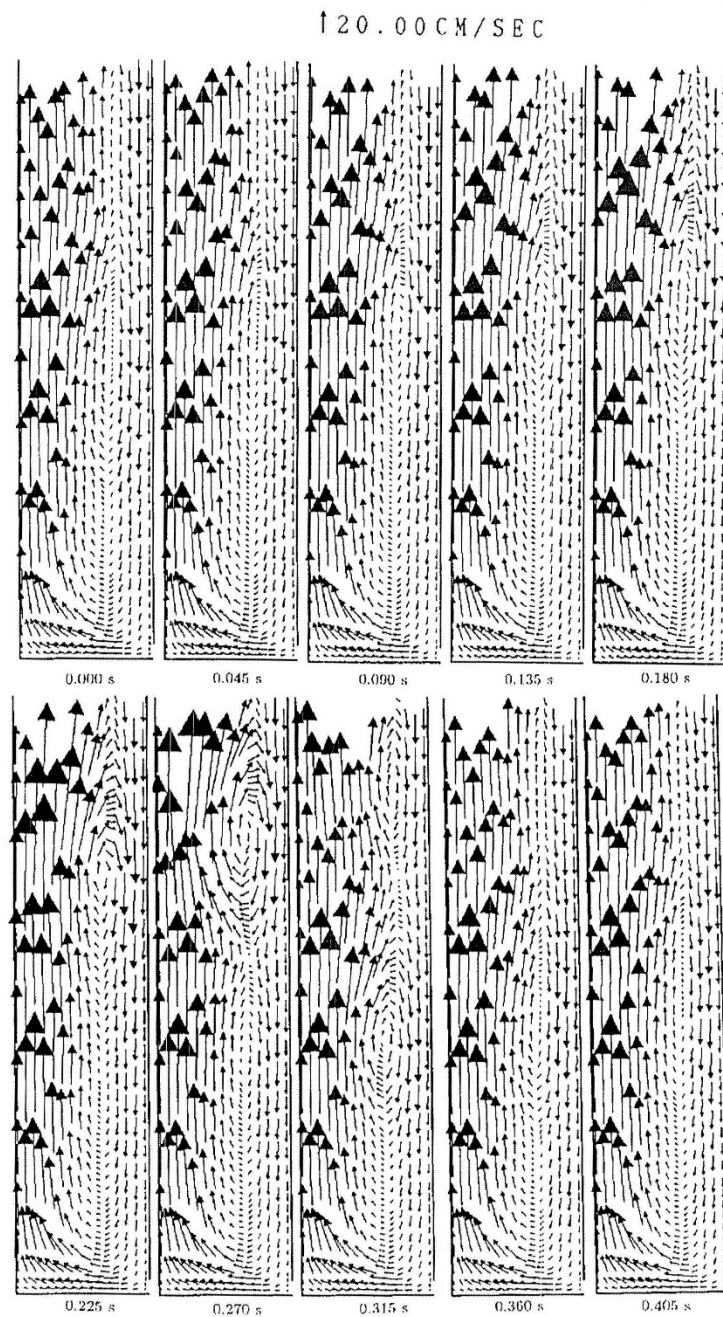
0.1 s

0.2 s

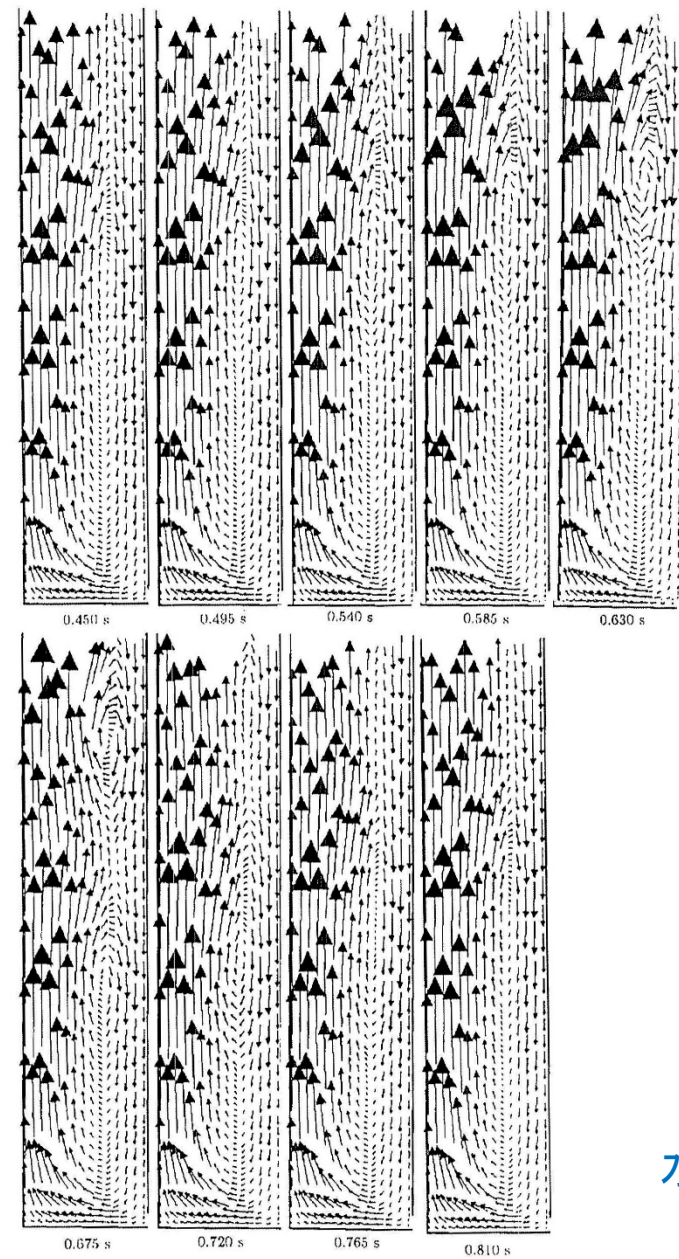
0.3 s

0.4 s

0.5 s

図 4.13: $P=115$ kPa のときの塔底部分 7cm の流れ場変動 (1)

4.2. 非定常流れ場解析

図 4.14: $P=115$ kPa のときの塔底部分 7cm の流れ場変動 (2)

水素1997年

窒素同位体分離実験

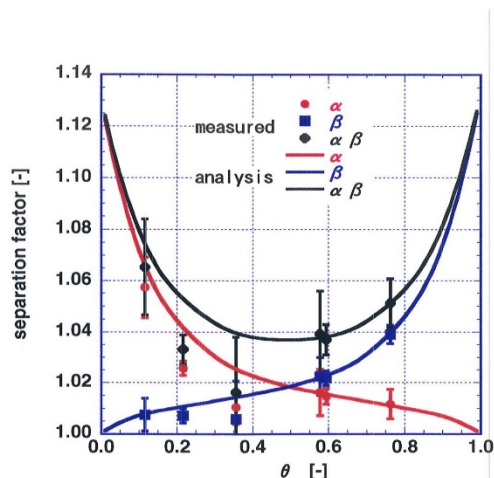


図 3-9 分離係数のカット依存性 ($T_c = 273$ K)

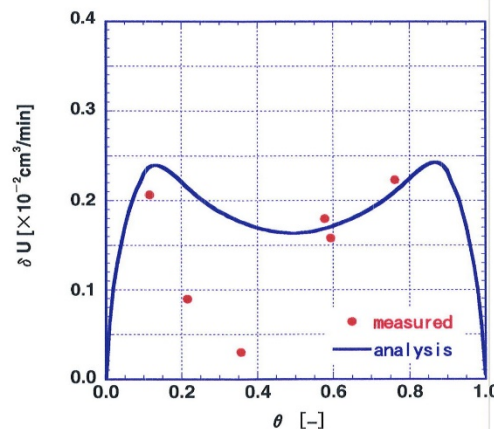


図 3-10 分離パワーのカット依存性 ($T_c = 273$ K)

44

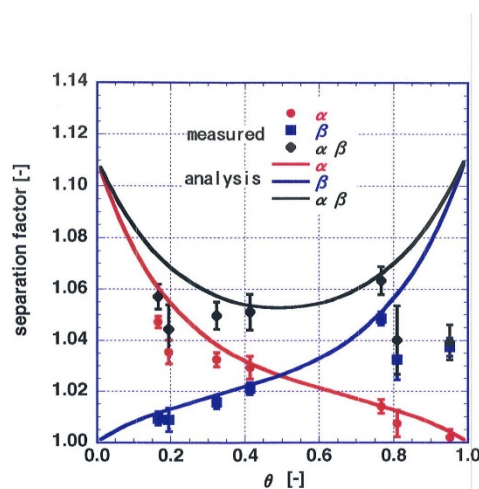


図 3-11 分離係数のカット依存性 ($T_c = 243$ K)

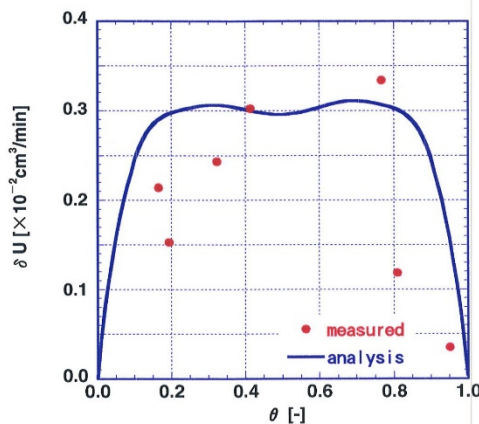


図 3-12 分離パワーのカット依存性 ($T_c = 243$ K)

45

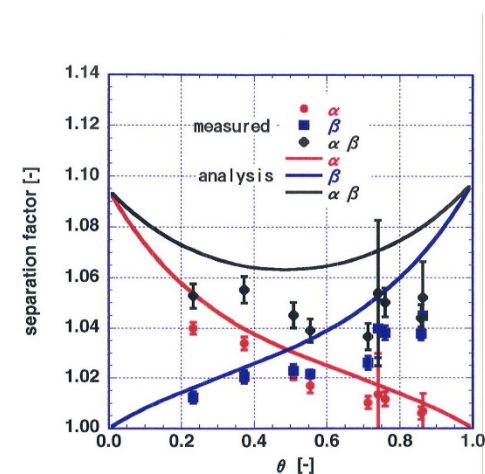


図 3-13 分離係数のカット依存性 ($T_c = 223$ K)

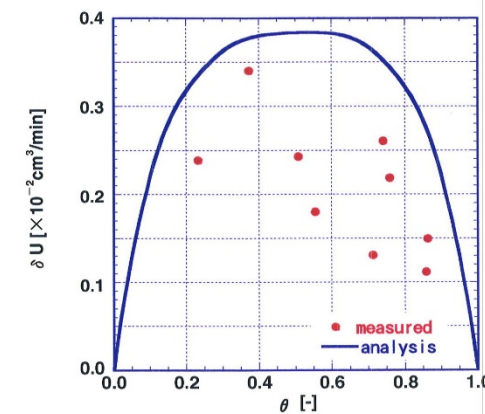


図 3-14 分離係数のカット依存性 ($T_c = 223$ K)

46

冷壁温度 273 K

243 K

223 K

熱管型
窒素同位体分離装置



2006年6月14日
結城文部科学事務次官視察

分離現象に関する国際会議 (SPLG'98)



SEPARATION PHENOMENA IN LIQUIDS AND GASES SIXTH WORKSHOP PROCEEDINGS



October 18-21, 1998
Nagoya Congress Center

Ichiro Yamamoto
Professor
Department of Nuclear Engineering
Nagoya University, Japan



COMMITTEES

HONORARY CHAIRPERSON

A. Kanagawa

Prof. Emeritus, Nagoya Univ.

INTERNATIONAL COMMITTEE

V. D. Borisevich

Moscow St. Eng. Phys. Inst., Moscow, Russia

T. Kai

Japan Nuclear Cycle Development Institute, Japan

P. Louvet

DPE/SPEA, C.E.N., Saclay, France

H. Mikami

Tokyo Institute of Technology, Tokyo, Japan

S. Schwab

IEAv/CTA, São José dos Campos, Brazil

Soubbaramayer

DPE/SPEA, C. E. N., Saclay, France

K. Takeuchi

Institute of Physical and Chemical Research, Saitama, Japan

J. V. Whichello

IAEA, Vienna, Austria

H. G. Wood

University of Virginia, Charlottesville, USA

C. Ying

Tsinghua University, Beijing, China

G. Zippe

MAN Technology, München, Germany

LOCAL ORGANIZING COMMITTEE

I. Yamamoto	Nagoya University , Chairperson
K. Ikeda	Cyubu Electric Power Company
Y. Fujii	Tokyo Institute of Technology
M. Hara	Japan Nuclear Fuel Limited
K. Hamada	Mitsubishi Heavy Industries
Y. Hayase	Federation of Electric Power Companies
H. Hiranuma	Japan Electrical Manufacturers Association
T. Kai	Japan Nuclear Cycle Development Institute
S. Kuwabara	Kansai Electric Power Company
Y. Mimura	Mitsubishi Heavy Industries
H. Moriyama	Kyoto University
M. Nishikawa	Kyushu University
K. Nishizawa	Osaka University
M. Ohno	Japan Audit and Certification Organization for Environment
Y. Sato	Laser Atomic Separation Engineering Research Association of JAPAN
T. Shibata	Japan Atomic Energy Research Institute
M. Suzuki	Tokyo Institute of Technology
T. Takahashi	Japan Nuclear Cycle Development Institute
M. Takemura	Hitachi Corporation
S. Tanaka	University of Tokyo
H. Tashiro	Institute of Physical and Chemical Research
H. Ueda	Toshiba Corporation
S. Yamada	Tokyo Electric Power Company
Z. Yoshida	Japan Atomic Energy Research Institute

CONFERENCE SECRETARIAT

Y. Enokida	Nagoya University
------------	-------------------









同位体COE（同位体が拓く未来）

- 平成15年（2003）7月 採択決定
- 平成16年（2004）3月 同位体科学会（藤井靖彦会長）創立
- 平成17年（2005）5月 中間審査
- 平成17年（2005）9月 ISE2005
（ International Symposium on Isotope Science and Engineering）
- 平成19年（2007）9月 ISE2007
- 平成19年（2008）9月 外部評価（石田孝信委員長）
- 平成20年（2009）3月 無事終了

同位体COE形成の目的

同位体関連研究者が結集・連携し、同位体科学を支える**基盤研究の飛躍的な発展**
とそれら基盤研究に立脚した**新たな融合研究の展開**を図る



研究：同位体科学バーチャルラボラトリ

大部分のメンバーが同位体科学バーチャルラボラトリの複数の部門に所属
専門の異なるメンバー間の協力・連携を推進

同位体科学バーチャルラボラトリの構成

分野	部門	リーダー
基盤研究	同位体分離・創製	山本 一良
	同位体計測	井口 哲夫
	同位体材料	松井 恒雄
融合展開	環境・生命	飯田 孝夫
	文理情報	鈴木 和博

21st Century COE Program
International Symposium on

**“Isotopes for the Prosperous Future”
~ Isotope Science and Engineering
from Basics to Applications”**

General Chairman : Ichiro Yamamoto



Nagoya University



21世紀COEプログラム

同位体が拓く未来

—同位体科学の基礎から応用まで—

基盤研究分野

同位体分離・創製 部門



名古屋大学大学院 工学研究科
山本 一良

超臨界流体置換クロマトグラフィー同位体分離法の原理実証

超臨界流体二酸化炭素クロマトグラフィー法によるリチウム同位体分離

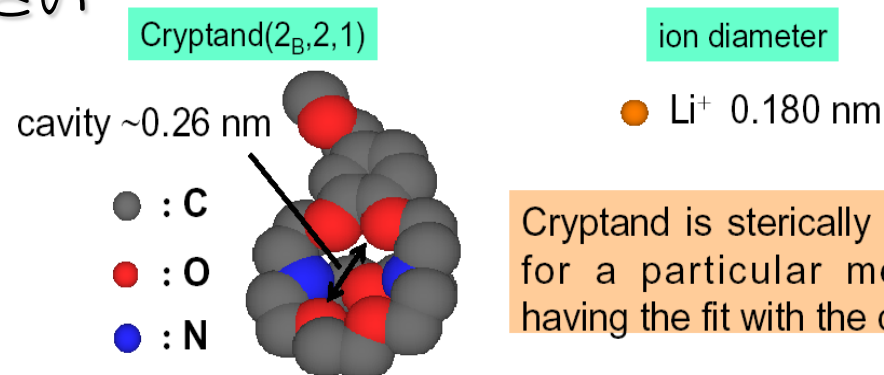
超臨界流体二酸化炭素の利点

21世紀の溶媒

- ・ 迅速な分離が可能であり、廃液の発生が極微量である
- ・ 有機抽出剤の溶解度が高い
- ・ 温度や圧力を変えることで、溶媒和を変えることができる
- ・ 環境への負荷を低減できる

クリプタンド(2_B, 2, 1)樹脂

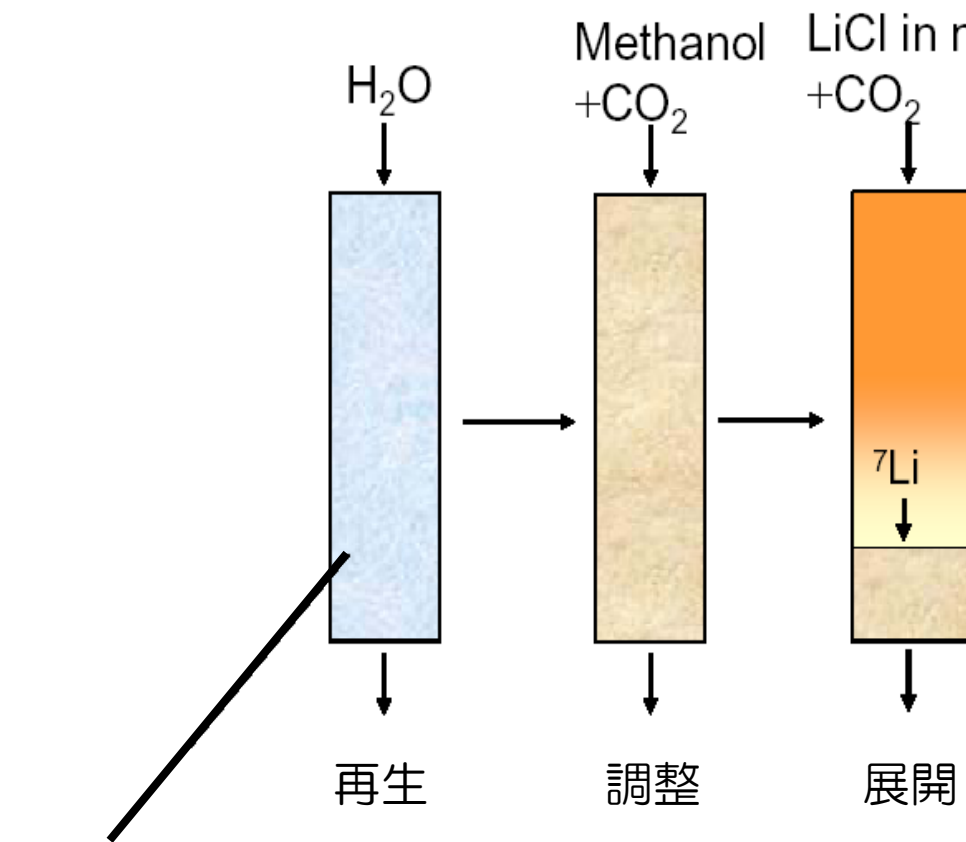
- ・ 濃縮係数が0.01-0.06と大きい
- ・ 水により樹脂の再生が可能



Cryptand is sterically selective for a particular metal ion having the fit with the cavity.

超臨界流体置換クロマトグラフィー同位体分離法の原理実証

ブレークスルー法



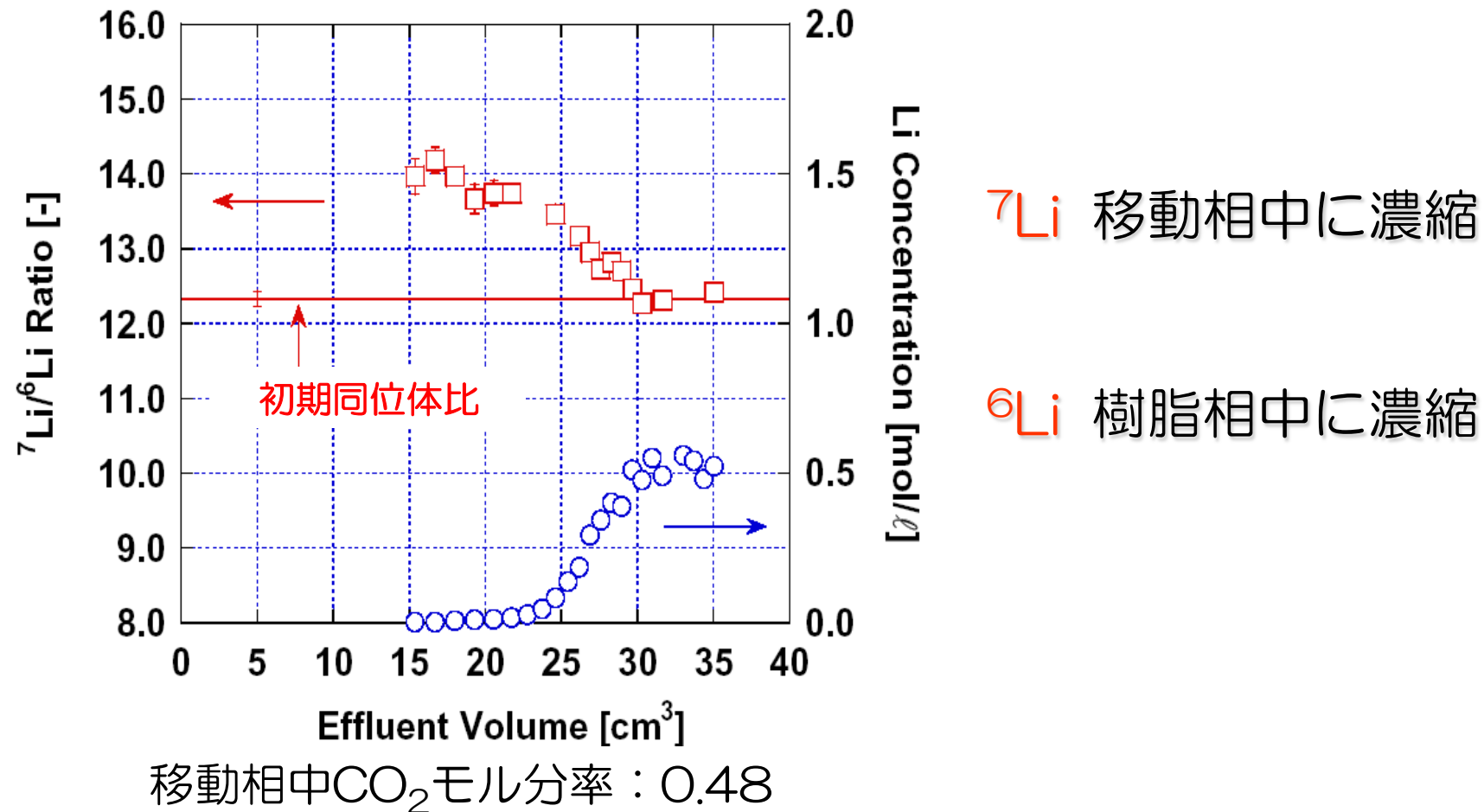
水により樹脂を再生した後、 $SF-CO_2$ とメタノールの混合溶液により調整する。

$SF-CO_2$, LiCl, メタノールの混合溶液を313 K, 10 MPaで供給する。

充填カラム

(内径 8 mm, 長さ 100 cm)

前端界面での $^7\text{Li} / ^6\text{Li}$ 同位体比分布



測定装置

LiCl 濃度	原子吸光計 (Hitachi Z-6100)
Li 同位体比	質量分析計 (Finnigan MAT ELEMENT)

超臨界流体置換クロマトグラフィー同位体分離法の原理実証

まとめ

- 固定相にクリプタンド（2_B, 2, 1）樹脂，移動相に超臨界流体二酸化炭素とLiClメタノール溶液の混合溶液を用いて置換クロマトグラフィー実験を行い，Li同位体分離が行えることを確認した。
- 本手法は，汎用的で経済的かつ環境負荷を低減できる。

21世紀COEプログラム

同位体が拓く未来

～同位体科学の基盤から応用まで～

平成17年度報告書



名古屋大学同位体科学COE

ISSN 0022-3131

Supplement 6
September 2008

JOURNAL OF NUCLEAR SCIENCE AND TECHNOLOGY

Isotope Science and Engineering
From Basics to Applications



Selected Papers from
International Symposium on Isotope Science and Engineering
From Basics to Applications

(3rd International Symposium on
Isotope Effects in Physics, Chemistry and Engineering)

Nagoya, Japan
September 17-20, 2007



ATOMIC ENERGY SOCIETY OF JAPAN

<http://www.soc.nii.ac.jp/aesj/>

思い出深い事柄(原子力関係)

- 2011年3月11日: 東日本大震災, 東電・福島第一原子力発電所事故
- 1999年 JCO 事故
- 青森県に ITER-BA の実験装置群(特にトリチウム実験室)設置
- 福井大学に原子力関係研究所, 学科の設置
- 六ヶ所村 日本原燃(株)ウラン濃縮工場へ設置する高性能新型遠心分離機の開発とそれらを用いたウラン濃縮カスケード設置
- 汚染水対策委員会委員, トリチウム水対策タスクフォース座長(進行中)
- 静岡県防災・原子力学術会議・原子力分科会長(進行中)

思い出深い事柄(学内関係)

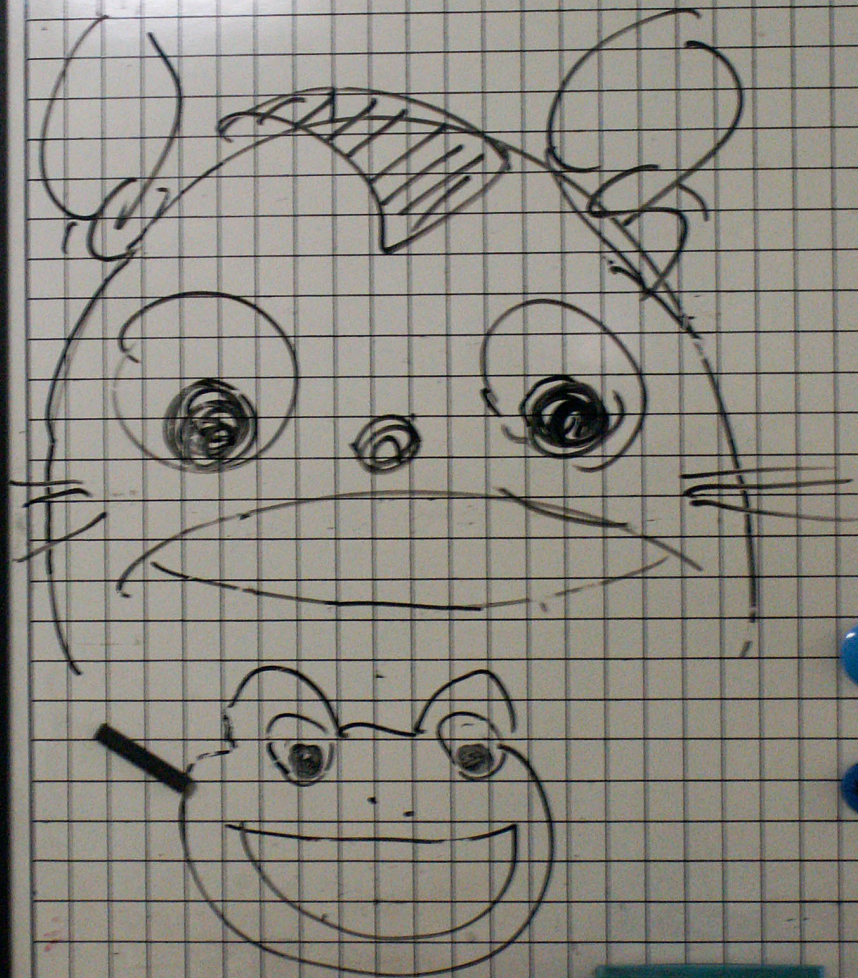
- 工学部あり方委員会
- 教養教育院の設立 と 語学教育改革
- 環境量子リサイクル研究センター設立
- 認証評価への対応: 試行「教養教育」、本格実施分
- 法人評価対応
- Global COE
- 創薬科学研究科新設
- Global 30(13?) 教育システム構築
- リーディング大学院 6 programs 採択
- 育志賞
- Top Global University
- 組織再編へ道半ば



工学の教育・研究への私見

- 先端研究の産物の「ハイテク」は、「ローテク」で確保された社会基盤があってこそ役立つし、社会基盤が疎かであれば使い物にならない
- 原子力は極限環境に対応した「ローテク」を極限的に追求した製造技術と維持・管理技術で成り立つ
- 現在の工学教育においては、社会ひいては国家を支える「ローテク」分野の部分が衰えてきた
- 工学における教育・研究・開発に携わるためには、今一度「ローテク」の工学基礎を学び、そのうえでハイテクの研究・開発に向かうべきである
- 工学系教育組織の改編においては、その部分を忘れないでほしい

祝 院試合格



工学部8号館南3F研究室 昔の掲示板（2004.9.10）



名古屋大学での42年間、
長きに亘り
いろいろな方々に
大変お世話になりました。

改めて感謝申し上げます。

ありがとうございました。



目次	
序	1
第1章 分離要素	3
Ⅰ 基礎的事項	3
[1] 分離要素の概念	3
[2] 分離係数の定義	7
《付録》 分離係数の例	10
Ⅱ 注目成分・非注目成分に関するカット	17
[1] 注目成分に関するカットの概念	17
[2] 分離係数との関係	18
[3] 洩れのある場合の扱い	21
[4] カットが決まっている場合の扱い	24
[5] カットの濃度依存性	31
《付録》 関数 $\frac{\alpha(\beta-1)}{\alpha\beta-1}$, $\frac{\beta-1}{\alpha\beta-1}$ の性質	32
1. 対称プロセスの場合	32
2. 非対称プロセスの場合	34
第2章 カスケード理論	41
Ⅰ 序 論	41
[1] カスケードの概念	41
[2] カスケード計算	45
Ⅱ カスケード流量方程式	47
[1] 基礎方程式	47
[2] 基礎方程式の一般解	51
[3] 洩れない場合の解	55
[4] カスケード濃度計算	58
[5] m-up n-down タイプのカスケードの流量方程式	61
《付録》 行列式 $B(i, j)$ の計算法	62
Ⅲ 各種カスケードのカット分布	73
[1] 準理想カスケード	73
[2] 方形カスケードと方形化カスケード	74

《付録》 方形化カスケードの流量計算法	86
第3章 分離パワー	92
Ⅰ 序 論	92
[1] 分離パワーの概念	92
[2] 分離パワー(2成分系)研究の歴史	95
Ⅱ 非対称分離プロセスの分離パワーと価値関数	111
[1] 緒 言	111
[2] 関数方程式の解の検討	111
[3] $\varphi(\alpha, \beta)$ の決定	112
[4] 非対称性の影響	115
[5] 結 論	118
《付録》 A $a=b \Leftrightarrow \alpha=\beta$ の証明	120
B 価値関数中の定数の決定法	120
Ⅲ 分離パワー概念の厳密化 = 注目成分, 非注目成分に関する分離パワー =	122
[1] 緒 言	122
[2] 注目成分, 非注目成分に関する分離パワー $\delta U_b, \delta U_a$	123
[3] カスケードの分離パワー	126
[4] $\delta U_b, \delta U_a$ による δU の解釈	130
[5] $\varphi_b(\alpha, \beta), \varphi_a(\alpha, \beta)$ の意味	130
[6] 結 言	133
《付録》 A 関数 $\frac{\alpha-1}{\alpha+1} \ln \alpha$	133
B 関数 $\varphi_b(\alpha, \beta), \varphi_a(\alpha, \beta)$ の性質	140
第4章 分離パワーの加算性	149
Ⅰ 序 論	149
[1] 理想カスケード	149
[2] 分離パワーの加算性	150
Ⅱ m-up n-down 理想カスケードの分離パワー	153
[1] 緒 言	153
[2] 1-up 1-down 理想カスケード	155
[3] 2-up 1-down 完全理想カスケード	157
[4] 2-up 1-down 同一分離工程理想カスケード	162
[5] m-up n-down 理想カスケード	165

《付録》 2-up 1-down カスケード	
流量方程式の解法	167
■ 分離係数が段毎に変化する理想カスケードの分離パワー	169
[1] 緒言	169
[2] 濃度分布	170
[3] 流量方程式	171
[4] 分離パワー	178
[5] 数値例	178
IV Hertz 型理想カスケードの分離パワー	180
[1] 緒言	180
[2] 流量方程式	180
[3] 理想カスケードの条件	184
[4] 分離パワーの加算性	186
V 分離パワーの加算性の数学的基礎	189
[1] 緒言	189
[2] 対称プロセス	190
[3] 非対称プロセス	192
《付録》 標準的関数方程式の解	200
(1) 関数方程式 $h(\alpha^2) = 2h(\alpha)$	200
(2) 関数方程式 $h(\alpha^2) = h(\alpha)$	200
(3) 関数方程式 $h(\alpha^n) = kh(\alpha)$	200
第5章 多成分分離理論	202
I 多成分分離カスケード流量方程式	202
[1] 緒言	202
[2] 多成分分離要素	208
[3] 流量方程式	205
[4] 存在比一致カスケード	208
[5] 分離係数が各段で変化しないカスケード	210
II 多成分系における分離パワー	218
[1] 緒言	218
[2] 各成分に関する分離パワー	214
[3] 多成分価値関数の合成	216
[4] 分離パワーの加算性	218

第6章 カスケードプラント設計の諸問題	223
I 序論	223
[1] 混合損失の評価	223
[2] 分離要素のモデル	227
■ カスケード段定数変動の影響	231
[1] 緒言	231
[2] 数学的準備	232
[3] カット変動	233
[4] カスケード供給流量変動	241
[5] カットが流量依存性を有する時の定式化	242
[6] 段定数と分離要素性能との関係	243
[7] 等カットカスケードへの適用(解析的扱い)	247
[8] 遠心分離機定数の評価	253
[9] 並列混合損失	257
[10] 遠心分離機で構成されたウラン濃縮カスケードへの応用	264
《付録》 プロダクト中の注目成分流量 G_{n+1} の θ_k に関する微分 ($k = f + 1, f + 2, \dots, n$)	269
■ カスケード濃縮度変更に対処する諸方法の比較	271
[1] 緒言	271
[2] プロダクト端から供給流への還流の効果	271
[3] モデルカスケードによる諸方法の比較	275
《付録》 物質保存式による濃縮度上昇割合の導出	279
VI カスケードの動特性	281
[1] 緒言	281
[2] 定式化	282
[3] 1-up, 1-down カスケードの動特性	284
[4] 2-up, 1-down カスケードの動特性	295
V 複数濃縮度への要求に対する製品濃縮度の設計	308
[1] 緒言	308
[2] 基本事項	308
[3] N. U. プレンディングと D. U. プレンディング	306
[4] E. U. プレンディング	314
[5] 複数濃縮度需要に対する効率	317
《付録》 $\partial U(N_p)$ が N_p に関して下に凸であることの証明	322

Ⅵ 非対称分離プロセスで構成されるカスケードの解析	823
〔1〕 結 言	828
〔2〕 非対称要素で構成される2種の理想カスケードの比較	824
〔3〕 要素非対称運転段内還流カスケード	826
《付録》 $\alpha = \beta^2$ の要素で構成された 1-up, 1-down カスケードの性質	834
Ⅶ 各種カスケードの効率	888
〔1〕 等カットカスケードの効率	888
〔2〕 方形(化)カスケードの効率	842
Ⅷ 多成分系分離理論の応用例	848
〔1〕 遠心分離カスケードへの空気洩れ込みの影響	848
〔2〕 放射性希ガスの分離回収	849
第7章 ま と め	854
あ と が き	856
参 考 文 献	857

あ と が き

本研究は昭和48年に名古屋大学に赴任以来約6年間にわたって従事した同位体分離の研究のうち、カスケードの基礎理論解析に関する部分をまとめたものである。本年は、分離パワーの概念が発見されてから(1989)、ちょうど40周年に当たるが、この時に、今までの理論を包含する形で新しい分離理論体系をまとめることができたことを幸いに思う。

本研究は、金川 昭教授の指導によるものである。カスケード理論の研究は、同教授の示唆により始められたものであり、その後も個々の問題について種々の討議を頂き、論理的思考、定量的把握、理論、パラメータの具体的意味づけの必要性など、工学者・技術者としての考え方、研究態度について御指導頂いた。また、内藤奎爾教授、天沼 稔教授には、この論文を作成するにあたって詳細、かつ有意義な助言を頂いた。更に、仁科浩二郎助教授、松本元一助教授には討論を通して多くの有益な助言を頂いた。また、著者の学生時代の指導教官である東京大学の山本 寛名誉教授、清瀬量平教授には、その後も暖かい助言と励ましを頂き、東京工業大学の高島洋一教授、三神尚助教授、京都大学の太石純教授、東 邦夫助教授、動力炉核燃料開発事業団の甲斐常逸博士、日立製作所の尾崎典彦博士には、折あるごとに詳細な討論をして頂いた。更に、著者の学生時代に御指導頂いた日立製作所の川合敏雄博士、元田 浩博士、木口高志博士は、講師として名古屋大学で御講演の際やその他の機会に、まだ未完成な理論体系を吟味し、有意義な助言を与えて下さった。

本研究をこのような形でまとめることができたのは、名古屋大学工学部原子核工学科金川研究室に在籍し、また在籍した多くの人々の協力のおかげである。青柳春樹氏(現日立化成から動燃事業団へ出向中)、水野康彦氏(現日立製作所)は、解析の結果を検討し、誤りの発見や不適当な部分の修正などの理論的援助、さらに、それらをプログラム化しての数値計算をして下さった。また、方形(化)カスケードについては、高橋和一氏(現極東貿易)、水谷栄志氏(現岐阜県高校教員)および鈴木喜博氏(現名古屋電子計算)、等カットカスケードについては長尾博文氏(現飯田電工)、段内還流カスケードについては奥田章秀氏(現大学院情報工学在学)、ブレンディング計算には宮本丞祐氏(現四国電力)、非対称カスケードの動特性については富田利之氏および赤井礼治郎氏、カスケードの多成分分離特性については岩瀬弥一郎氏、以上多くの方々の数値計算に関する御協力を得た。本研究は理論解析と数値計算が相補って発展させられたものであり、その意味からすれば、上記の各氏との共同研究と言ってよい。また、濃縮グループの古沢雄二氏(現三菱重工)、田中 敦氏(現動燃事業団)、伊藤邦雄氏(現日本NUS)、野田真司氏(現富士写真フィルム)、林 正明氏(現NBO)には有益な討論をしていただいた。また、高橋武士氏、角尾照雄氏(現小野工務店)勲柄邦博氏(現愛知県教育委員会)、加藤陽子氏をはじめとする金川研究室の皆様には、研究遂行上多大の御援助をいただいた。ここで、あらためて感謝の意を表する。

大学の役割

- 大学の第一の役割は、**教育**である。
- しかし、単に従来からの知見を教授するだけでは不十分であり、
- 従来からの知見を**体系化・整理**して、**学術の基盤**を固め、
- さらに**基礎研究を推進**することで**学術の発展**に寄与し、
- それを通じて**人材を養成**することが必要である。

「わかる」の階層構造 (私見)

- レベル $-\infty$ その存在を知覚しない
- レベル 1 : 現象の存在を知覚「何かある」
- レベル 2 : 現象を定性的に把握
- レベル 3 : 現象を定量的に把握(オーダーまで)
- レベル 4 : 現象を定量的に予言可能

(工学的に設計可能なレベル)

- レベル 5 : 現象の生じる機構を完全に理解
- レベル ∞ (ひょっとすると)現象理解枠組みの変更

これらのレベルは対数的, 必要資源も対数的

研究・開発に関わる教育の役割(私見)

- 既存の現象理解の枠組みを教えること
- (枠組みの中で) 未知の問題を解決する方法(スキル)を身に着けさせること
- 枠組みを突破するポテンシャル(意欲)を身に着けさせること
しかし
- (情報の洪水の中で) 全てを教えることはできない
- (教える側が) 全てを知っているわけではない
- (開き直れば) 全てを教える必要はない
何が本物であるかを見極める力
研究現場で共同作業をしながら身につける

研究・開発の階層構造 (私見)

- レベル 0 : 原理 (自然現象理解の枠組み)
- レベル 1 : ひらめき, 思いつき ~1000
- レベル 2 : 思考実験, 簡単なモデル解析 ~100
- レベル 3 : 簡単な実験装置による確認 ~10
- レベル 4 : 詳細な解析・現象の詳細な理解 ~5
- レベル 5 : 何らかの実用化 1以下
- レベル ∞ (ひょっとすると) 現象理解枠組みの変更

これらのレベルは対数的

大学は自由な発想 (研究自体の面白さ) を引き出し,
それを育てる場所 (これを通して人材を育成)

研究投資とその効果(私見)

- 「わかる」のレベル, 「研究・開発」のレベル・規模に応じた資源投資が重要 「わかる」の各レベルで必要な資源(例えば, 精密な測定・観測のための手段, 実験装置など)の見極めが重要. 研究・開発のレベル3程度までは広範囲の草の根的研究
- レベル, 規模を無視した過度の「選択と集中」は愚策 大学学科・専攻レベル, 附置センター, 附置研究所, 民間会社等研究開発組織, 国レベル研究機関, 世界規模研究機関
- プロジェクトのみでは学術が死ぬ プロジェクトは, ある程度わかった現象・事象が相手. プロジェクト進行中は学術進歩が停滞の恐れ. プロジェクト手前の広範囲の研究が活力の基.
- 研究投資と生み出される結果との関係 「ある段階までは, 生み出される結果の数は, 投資の対数に比例し, 投資規模の適値を超すと, 逆に反比例する」(これは規模・レベルに依存する)