

916541

高等学校试用教材

化学法分离同位素原理

邱 陵 编著
张青莲 主审

原子能出版社

高等学校试用教材

化学法分离同位素原理

(初版)

邱陵 编著

张青莲 主审

王文清 顾镇南 朱永贍

庄亚辉 张毅然

原子能出版社

内 容 简 介

本书全面、深入地阐述了化学法分离同位素的原理。内容包括有关的国内外新资料和作者自己的科研、教学成果。着重介绍了氘、铀、硼、碳、氮、铀等同位素的分离原理。

本书可作为高等学校同位素专业高年级学生和研究生教科书，也可供从事化学法分离同位素研究的科技人员参考。

☆ ☆ ☆

本书由张青莲主审，经放射化学及核化工教材委员会于1987年3月由王文清主持的审稿会审定，作为高等学校试用教材。

高等学校试用教材
化学法分离同位素原理

(初版)

邱 陵 编著

张青莲 主审

王文清 顾镇南 朱永贇

审校

庄亚辉 张毅然

原子能出版社出版

(北京2108信箱)

北京海淀昊海印刷厂印刷

新华书店总店科技发行所发行·新华书店经售

☆

开本 787×1092 1/16·印张 17·字数 421 千字

1990 年 6 月北京第一版·1990 年 6 月北京第一次印刷

印数 1—1000

ISBN 7-5022-0235-8
TL·89(课) 定价: 3.35元

前 言

本书是根据原核工业部 1986 年制定的高等院校原子能教材编审出版规划编写的, 可作为高等学校同位素专业高年级学生和研究生教材。

近 40 多年来, 对同位素的化学分离法的研究有了很大进展。法国和日本先后完成了用化学交换法分离铀同位素的工程验证研究, 显示出该法的应用前景。尽管用化学法分离重同位素的分离系数远小于物理法, 但由于这一领域中很多杰出的研究者在理论和技术上不断创新, 现在化学分离法已成为很重要的同位素分离手段。这种方法不仅适用于轻同位素的分离, 而且在中、重同位素分离领域也有很强的竞争力。

化学法分离同位素的研究人员遍布各国, 我国也有一批科技工作者一直从事这一领域的研究和开发。但详细阐述化学法分离同位素的原理、特别是反映 60 年代以来成就的参考书还不多见。鉴于此, 作者在科研工作和研究生教学工作的基础上, 编著此书。

由于作者水平所限, 错误和不足之处在所难免, 敬请海内外同行指正。

感谢北京大学张青莲主持本书的审稿工作, 他和王文清、顾镇南、朱永贍、庄亚辉、张毅然等同志对本书的修改提出了很多宝贵意见, 其中, 王文清审校了第八、九章; 顾镇南审校和改写了第一、二、三章; 朱永贍审校了第四、五章; 庄亚辉审校了第六章; 张毅然审校了第七章。在本书最后完成阶段, 由于作者工作调动, 无暇完成书稿的最后整理和订正, 由王文清组织有关人员完成了定稿, 并请顾镇南把原稿第一、二章压缩改写为新的第一章; 寿椿同志对本书稿作了一些文字工作和全稿的抄清工作。对此, 作者深表谢意。

作者

1988.10

BA095/108

目 录

本书采用符号说明	1
第一章 绪言	9
一、同位素概念的提出及发展	9
二、同位素的用途	9
三、同位素分离方法的分类	9
四、物理法	11
§ 1. 电磁分离法	11
§ 2. 气体扩散法	11
§ 3. 离心法	11
§ 4. 热扩散法	12
§ 5. 蒸馏法	13
五、化学法	15
§ 6. 电解法	15
§ 7. 电泳法	16
§ 8. 化学交换法	18
第二章 热力学同位素效应	20
一、引言	20
二、用统计力学计算同位素交换平衡常数	21
§ 1. 分子的能级和分子光谱	21
§ 2. 分子的简正振动和零级能	21
§ 3. 玻耳兹曼分布	22
§ 4. 配分函数	23
§ 5. 约化配分函数比	24
§ 6. Bigeleisen-Mayer 长式、短式和 $\frac{1}{24}$ 规则	26
三、热力学同位素效应的某些规律性	31
§ 7. 约化配分函数比与温度的关系	31
§ 8. 约化配分函数比与同位素质量的关系	32
§ 9. 约化配分函数比和化学键	32
§ 10. 化学交换平衡中的同位素效应	34
§ 10.1. 同位素富集的方向性	34
§ 10.2. 化学物种和同位素交换平衡常数	35
§ 10.3. 同位素交换平衡常数与温度的关系	37

§ 10.4. 同位素交换平衡常数与压力的关系	37
四、约化配分函数比的理论计算	38
§ 11. Born-Oppenheimer 近似原理	38
§ 12. 分子模型	39
§ 13. 简正坐标和简正振动	39
§ 14. 内坐标	41
§ 15. 力场和力常数	42
§ 16. 以内坐标表示的 G-F 行列法	42
五、对称性和分子振动	44
§ 17. 对称元和点群	44
§ 18. 点群在对称操作下的动态特性	47
§ 19. 红外和拉曼光谱中的选择定则	49
§ 20. 频率的兼并	50
六、G-F 行列法计算举例	51
§ 21. 双原子分子	51
§ 22. 直线型 X-M-X 分子	54
§ 23. 平面三角型分子 MX_3	57
§ 24. 四面体型分子 MX_4	59
§ 25. 正八面体型分子 MX_6	63
七、热力学同位素效应的变化规律和预测	65
§ 26. 同位素效应解析	65
§ 27. 化学信息和同位素效应	67
§ 28. 同位素交换反应的分类和同位素效应的预测	70
第三章 同位素在两相间分配的理论	74
一、引言	74
二、络合反应对同位素分离系数的影响	75
§ 1. 第 I 相中的同位素交换平衡	76
§ 2. 第 II 相中的同位素交换平衡	76
§ 3. 两相间的同位素交换平衡	77
§ 4. 络合反应与同位素单级分离系数	78
§ 5. $\frac{1}{2}K_2$ 或 $f'(z,0)/f'(z,0)$ 的物理化学意义	80
§ 6. 化学反应的同位素效应	81
三、某些分离体系的同位素分离系数的理论考察	83
四、有络合反应的同位素两相分配理论应用举例	86
§ 7. 第 I 相中存在 MX 的体系	86
§ 8. 第 I 相中存在二级络合物、第 II 相中不存在配位体的体系	88
§ 9. 第 I 相中存在 MX 、第 II 相中存在 MY 的体系	90
五、电子交换体系的两相分配理论	92
六、两相分配理论和离子交换体系的铀同位素分离系数	93

第四章 同位素交换反应的速度和机制	100
一、引言.....	100
二、交换反应速率式.....	101
三、研究方法.....	102
四、溶液中的同位素交换机制.....	103
§ 1. 电子传递机制.....	105
§ 2. 原子授受机制.....	108
§ 2.1. 络合机制.....	108
§ 2.2. 解离机制.....	110
五、络盐中的同位素交换.....	111
六、溶液中同位素交换的催化机制.....	114
七、化学性质的相似性和同位素交换速度.....	116
第五章 分离柱特性和同位素色谱分离柱	119
一、引言.....	119
二、分离柱特性.....	121
§ 1. 理论塔板.....	121
§ 2. 传质系数、传质方程和浓度势 (Concentration Driving Potential)	122
§ 3. 传质单元高度 (HTU)	124
§ 4. 柱的操作和起动时间 (Start Up Time)	126
§ 5. 逆流操作柱的稳定态.....	127
三、色谱柱特性.....	128
§ 6. 色谱柱操作.....	129
§ 7. 排代色谱特性.....	130
§ 8. 单级分离系数的测定.....	131
§ 9. 色谱柱中的传质参数.....	134
四、色谱法分离同位素的理论.....	136
§ 10. Glüeckauf 的塔板理论.....	137
§ 11. 垣花秀武 (H. Kakihana) 的同位素分离理论	141
§ 11.1. 斜率系数 (Slope Coefficient) 和富集系数 (Enrichment Coefficient)	141
§ 11.2. 起动时间 t_s	144
§ 11.3. 富集区和贫化区宽度及变化	147
§ 11.4. 单位体积单位时间内的最大供料量 $U_{1, \max}$	148
§ 11.5. D_i 和 g 的物理意义.....	149
五、色谱柱分离同位素的回顾与展望.....	150
第六章 铯同位素分离	156
一、引言.....	156
二、离子交换法.....	156
§ 1. 单级分离系数和交换速度.....	156
§ 2. 离子交换的柱分离.....	162

三、汞齐法	163
§ 3. 历史回顾	163
§ 4. 单级分离系数	164
四、熔盐逆流电迁移法	167
§ 5. 单级分离系数	167
§ 6. 理论塔板当量高度	168
§ 7. 电迁移过程中同位素的动态分布	170
§ 8. 锂熔盐的逆流电迁移装置	170
五、冠状化合物分离锂同位素	173
§ 9. 冠状化合物	173
§ 10. 冠状化合物和锂同位素分离	175
第七章 氢同位素分离和重水的生产	182
一、重水的生产	182
§ 1. GS 法	183
§ 2. 单温和双温法的工作状态与有关参量	185
§ 3. $\text{H}_2\text{O}/\text{HD}$, NH_3/HD 和 $\text{NH}_3\text{NH}_2/\text{HD}$ 交换法	187
§ 4. 方法的评价	189
二、氘的除去	191
第八章 硼同位素分离	193
一、化学交换蒸馏法	193
§ 1. 常温化学交换蒸馏	193
§ 2. 低温化学交换蒸馏	195
二、离子交换法	196
§ 3. 单级分离系数	196
§ 4. 柱分离	202
第九章 化学交换法分离铀同位素	205
一、引言	205
二、液-液交换法	207
§ 1. $\text{U(III)}-\text{U(IV)}$ 同位素交换平衡	207
§ 2. 萃取剂和络合剂	208
§ 3. 两相的物理化学条件	209
§ 4. 同位素交换塔和回流	209
§ 5. CHEMEX 法的优点	211
三、固-液交换法	212
§ 6. 利用 UO_2^{2+} 化学物种之间的同位素交换体系	212
§ 6.1. 单级分离系数	212
§ 6.2. HETP	217

§ 7. 利用 $U(IV)$ 化学物种之间的同位素交换体系	223
§ 8. 利用 $U(IV)$ - $U(VI)$ 之间的同位素交换反应	226
§ 8.1. $U(IV)$ - $U(VI)$ 同位素交换平衡	226
§ 8.2. $U(IV)$ - $U(VI)$ 同位素交换动力学	229
§ 8.3. 阳离子交换 $U(IV)$ - $U(VI)$ 氧化-还原排代色谱法分离铀同位素	235
§ 8.4. 阴离子交换 $U(IV)$ - $U(VI)$ 氧化-还原排代色谱法分离铀同位素	251

本书采用符号说明

a_{ij} : G 矩阵元 g_{ij} 的系数
 A, A_1, A_2 : 不可约表示
 A_a, A_b, A_c : 多原子分子
 A_e : 电迁移管有效截面
 A' : 常数
 $A'_{(t)}$: 富集系数 $= \phi' \exp(\hat{f} \cdot g \cdot t) \cdot \exp(g \cdot Z_p)$
 $A'M, A^2M$: 进行同位素交换的分子
 A_E : 误差方程
 b, b^* : 光谱振动项
 $\tilde{b}: (\tilde{V} - V_i) / \epsilon \tilde{V}$
 B, B_1, B_2 : 不可约表示
 $\underline{B}$: 内扩散常数
 B' : 常数
 B^2M : 重同位素分子
 C : 光速
 C_n : n 次对称轴
 C' : 常数
 C_1, C_g, C_s : $C_1 = \epsilon(L+G)$; $C_s = \frac{1}{2}(L+G)$; $C_s = \overline{H}$
 C_i : 化学物种 i 在液相中的当量浓度
 C_i^0 : 重同位素的起始浓度
 $\hat{C}_i(Z, t)$: t 时刻, Z 截面上同位素物种 i 在固、液两相中的总浓度
 $\hat{C}_i^s(Z, t)$: t 时刻, Z 截面上同位素物种 i 在固相中的浓度
 $\hat{C}_i^l(Z, t)$: t 时刻, Z 截面上同位素物种 i 在液相中的浓度
 $\hat{C}_i(Z, t)$: 同位素物种 1 和 2 的总浓度
 $\hat{C}_i$: 坪区中的滞留量
 ΔC : 第 I 相中络合反应提供的同位素效应
 ΔC : 第 II 相中络合反应提供的同位素

效应

C_L : L 相中被输送的指定同位素浓度
 C_G : G 相中被输送的指定同位素浓度
 C_o : 供料中指定同位素的浓度
 C_d : 产品中指定同位素的浓度
 C_i : 指定同位素的浓度
 C_p : 平衡态时指定同位素的浓度
 C_B : B 在液相中的浓度
 C_i^s, C_i^l : 同位素物种 i 在固相和液相中的浓度
 C_n : n 次对称轴
 d^0 : 分子间距离
 d_i : 原子间平衡位置时的距离
 d : M-X 原子间的距离
 d_s, d_z : d_z 柱高体积内两相接触面
 d_{ij} : Badjer 常数; i, j : 周期表行、列数
 D' : 常数
 D_a : 给电子体
 $\bar{D}$: 固定相中同位素 i 多余的富集量
 $\underline{D}$: 内扩散系数 (cm^2/s)
 $\hat{D}_i(Z, t)$: 同位素物种 i 在 t 时刻, Z 截面处的异相扩散系数 (cm^2/s)
 D' : 有效扩散系数 (cm^2/s)
 D_F : 供料 (水) 中的氘浓度
 D_W : 尾料中的氘浓度
 E : 分子间位能
 E_0 : 零级能
 E_v : 振动能
 E_T : 总能量
 E_i : 第 i 种能级的能量
 E_t : 平移运动能
 E_R : 转动能

E_e : 电子绕核运动的能量
 E_N : 核自旋能量
 ΔE_a : 活化能
 ΔE : 两种量子运动的能级差
 E' : 常数
 $\tilde{E}$: 单元矩阵
 E_s : 对于对称中心为对称的双重简并振动
 E_a : 对于对称中心为反对称的双重简并振动
 E_a : 能耗
 E_r : 最大富集量
 E_d : 最大贫化量
 E : 电场强度
 f_d : 分子振动力常数
 f_{ij} : GVF 力场的相互作用力常数
 f_{ii} : GVF 力场的伸缩或扭曲力常数
 f_a : 扭曲振动力常数
 f_b : 离开平面时的扭曲力常数
 f_{dd} : 邻近的键作伸缩振动时相互作用常数
 f_{aa} : 邻角角变振动时相互作用常数
 f'_{aa} : 伸缩和非邻角角变振动时相互作用常数
 f'_{aa} : 伸缩和两邻角角变振动时相互作用常数
 f'_{aa} : 无公用键的角变振动相互作用的力常数
 f_{da} : 伸缩和邻角角变振动相互作用的力常数
 f'_{dd} : 对置的键伸缩振动时相互作用常数
 f : 配分函数比
 f^r : 约化配分函数比
 f_{AM}, f_{BM} : AM 和 BM 的配分函数比
 f_z^0 : 非溶剂合的 MX₂ 同位素物种在第 I 相中的配分函数比
 f_z^0 : 非溶剂合的 MX₂ 同位素物种在第 II 相中的配分函数比
 f_z : 溶剂合的 MX₂ 同位素物种在第 I

相中的配分函数比
 f_z : 溶剂合的 MX₂ 同位素物种在第 II 相中的配分函数比
 f_{ij} : F 矩阵中的矩阵元
 f_i : 第 i 份流出液的总量
 $\hat{f}: (\bar{V}_1 \hat{D}_2 - \bar{V}_2 \hat{D}_1) / (\hat{D}_1 - \hat{D}_2)$
 F_0, F^* : 能谷和能垒处同位素离子的配分函数
 F_t : UBF 力场的相斥常数
 F'_t : UBF 力场中非键合原子间的相斥常数
 F_s : 对于对称中心为对称的三重简并振动
 F_a : 对于对称中心为反对称的三重简并振动
 F : 配位体
 F : 法拉第常数
 F_t : t 时刻的交换度
 F_s : 柱截面
 F_c : 供料量
 F_G : 被 G 相所占的柱截面分数
 ΔF^0 : 标准自由能的增量
 g_i : 第 i 能级的简并数
 g : 斜率系数 $= (\bar{V}_1 - \bar{V}_2) / (\hat{D}_1 - \hat{D}_2)$
 g^f : 排代区段前沿的斜率系数
 g^r : 排代区段后沿的斜率系数
 G^0 : 自由能
 G^{-1} : G 矩阵的逆矩阵
 $G(u)$: G 函数 $= \frac{1}{2} - \frac{1}{U} + \frac{1}{e^U - 1}$
 G : G 相物料流量
 h : 普朗克常数
 h : Martin 塔板高
 H_t : UBF 力场的扭曲常数
 $\bar{H}$: 滞留量
 $\bar{H}_L, \bar{H}_G$: L 相和 G 相中的滞留量
 $\bar{H}$: Glueckauf 塔板高度
 $\bar{H}_U$: 铀的滞留量

H_0 : Snyder 公式中的系数 $H = H_0(\vec{V})^{\beta_0}(r)^{\gamma_0}$
 ΔH^0 : 标准状态下的焓变
 i : 周期表行数
 i : 对称中心
 I : 转动惯量
 I : 恒等 (一种对称元)
 $\hat{I}$: 传质单元高度
 I^+ : Li^+ 的电流
 j : 周期表列数
 j_L : 单位时间内通过单位相接触面的物质输送量
 j : 一定相内传质时, 单位时间内越过单位柱体积中两相接触面的输送量
 j_L : 液相传质时, 单位时间内越过单位柱体积中两相接触面的输送量
 $\overline{j}$: 产品产率
 $\overline{j_0}$: 预定的产品产率
 $J_{\min}$: 最小物料量
 k : 玻耳兹曼常数
 k : 反应速率常数
 k_c : 以浓度表示的传质系数 (m/h)
 k_x, k_y : L 相和 G 相内指定同位素以 mol 分数表示的传质系数 ($\text{mol/m}^2 \cdot \text{h}$)
 $k_x = k_c \cdot n_L$ (从 L 相向 G 相转移),
 $k_y = k_c \cdot n_G$ (从 G 相向 L 相转移).
 k_L, k_G : L 相和 G 相内指定同位素的膜传质系数 ($\text{mol/m}^2 \cdot \text{h}$)
 $\overline{k}$: 内扩散传质系数 ($\text{mol/m}^2 \cdot \text{h}$) (以 mol 分数表示)
 $\overline{k_c}$: 以浓度表示的内扩散传质系数 (m/h) $\overline{k_c} \cdot n = k$
 k_F : 以浓度表示的扩散液膜传质系数 (m/h) $k_F = k_L/n_L$,
 $k_F \cdot S_0/\alpha_i = R_L$
 k_r : 单分子反应速率常数
 $\overline{K_P}$: 同位素交换平衡常数
 $\overline{K_F}$: 固相中同位素交换平衡常数

K_t : UBF 力场的伸缩常数
 K_n : 第 I 相中第 n 级对 n-1 级络合物的同位素交换平衡常数
 $\overline{K_n}$: 第 II 相中第 n 级对 n-1 级络合物的同位素交换平衡常数
 $K_{n,1}$: 第 I 相中 MX_nF_1 对 $\text{MX}_{n-1}\text{F}_{1-1}$ 络合物的同位素交换平衡常数
 $\overline{K}_{n,1}$: 第 II 相中 MX_nY_1 对 $\text{MX}_{n-1}\text{Y}_{1-1}$ 络合物的同位素交换平衡常数
 $\frac{1}{2}K_z$: MX_z 在两相间的同位素交换平衡常数
 $K_{n,K}$: $U(N)$ 水解常数
 K_i : 元素的分配比 $K_i = \frac{C_i^I + C_i^{\text{II}}}{C_i^I + C_i^{\text{II}}}$
 $(1 - \alpha_0)$
 K_i : 同位素物种 i 的分配比
 K_w : 储存量
 l_n^0 : MX_n 络合物中的水合数
 l_n^1 : MX_nF_1 络合物中的水合数
 $\overline{l_n^1}$: MX_nY_1 络合物在第 II 相中的水合数
 l : 平均自由程
 $L_{\min}$: 最小物料流
 L_{ab}^1 : 从 a 到 b 截面间的距离
 L_0 : 电泳管长度
 L : L 相物料流量
 m : 分子的绝对质量
 m_1, m_2 : 轻、重同位素原子或离子质量 ($\Delta m = m_2 - m_1$)
 m_{co} : 配位原子质量
 m : 离子质量
 m_n^0 : MX_n 络合物的溶剂合数
 m_n^1 : MX_nF_1 络合物的溶剂合数
 m_n^1 : MX_nY_1 络合物在第 II 相中的溶剂合数
 M : 分子量
 M_1, M_2 : 轻、重同位素分子的分子量

$^1M, ^2M$: 轻、重同位素
 $[^1M], [^2M]$: 轻、重同位素分子的浓度
 $[^1M_0], [^2M_0]$: 轻、重同位素分子在供料中的浓度
 $M_{Fe(III)}$: 排代剂中 $Fe(III)$ 的 mol 浓度
 $M_{Fe(III)}^*$: 有效排代离子 $Fe(III)$ 的 mol 浓度
 $\overline{M}_{Fe(III)}$: 树脂相中 $Fe(III)$ 的 mol 浓度
 $M'_{Fe(II)}$: $Fe(III)$ 还原后, 穿透过铀区段前界面的 $Fe(II)$ mol 浓度
 $M_{UT}, \overline{M}_{UT}$: 液相和树脂相中 $U(IV)$ 和 $U(VI)$ mol 浓度之和
 $M_{U(IV)}, \overline{M}_{U(IV)}$: 液相和树脂相 $U(IV)$ 的 mol 浓度
 $M_{U(VI)}, \overline{M}_{U(VI)}$: 液相和树脂相 $U(VI)$ 的 mol 浓度
 $M_{Ti(III)}, \overline{M}_{Ti(III)}$: 液相和树脂相中 $Ti(III)$ 的 mol 浓度
 $M_{Fe(II)}, \overline{M}_{Fe(II)}$: 铀区段内 $Fe(II)$ 的液相和固相的 mol 浓度
 $M_{Ti(IV)}, \overline{M}_{Ti(IV)}$: 铁区段内 $Ti(IV)$ 的液相和固相 mol 浓度
 $M_{Ti(IV)}, \overline{M}_{Ti(IV)}$: 铀区段内 $Ti(IV)$ 的液相和固相 mol 浓度
 $M_{H^+}, \overline{M}_{H^+}$: 铁区段内 H^+ 的液相和固相 mol 浓度
 $M_{Ti(III)}^0$: 排代剂中 $Ti(III)$ 的 mol 浓度
 $M_{Fe(III)}^1, \overline{M}_{Fe(III)}^1$: 铀区段内 $Fe(III)$ 的液相和固相 mol 浓度
 $M_{Fe(III)}^2, \overline{M}_{Fe(III)}^2$: 阻滞剂区段内 $Fe(III)$ 的液相和固相 mol 浓度
 $M_{Fe(III)}^0$: 阻滞剂中 $Fe(III)$ 的 mol 浓度
 M_0 : 排代区段内同位素浓度保持不变的某点

n : 配位体数; 正整数
 n_c : 单位长度的床所包含的级数
 n_i : 处在第 i 级能级的分子数, $\sum n_i = N$
 n_p : 一个平衡级中的传质单元数
 n_L : L 相中同位素总 mol 浓度
 n_G : G 相中同位素总 mol 浓度
 $\overline{n}$: 树脂相中同位素总 mol 浓度
 N_0 : 分子总数
 N_0 : 离子交换容量
 N : 总塔板数
 N_m : 传质单元数
 N_{min} : 最少平衡级数
 N_p : 产品中指定同位素的 mol 分数
 N_1, N_2 : 轻重同位素的 mol 分数
 ΔN_1 : 电迁移过程中, 阴极区内轻同位数增加的 mol 分数
 O_b : 点群
 O_x : 氧化态
 p, P_p : 正整数
 p_x : a 和 b 截面间的 Martin 塔板数
 p_e : 原点和前端点间的 Martin 塔板数
 P_1^0, P_2^0 : 轻、重同位素分子的饱和蒸汽压
 P : 压力
 P : 产品流量
 P_1, P_2 : 轻、重同位素分子的蒸汽压
 P_e : 区段中总塔板数
 $\tilde{P}$: $\varepsilon \sqrt{N}$
 q_i : 质-重卡笛逊位移坐标
 q_i^0 : 振幅
 q, Q_i : 正整数
 q_s : 富集度 $= C_s(1-C_0)/C_0(1-C_s)$
 q_B : 树脂相中吸附的硼量
 Q : 配分函数
 Q_i : 简正坐标

Q_t : 分子平移运动的配分函数
 Q_R : 分子转动运动的配分函数
 Q_v : 分子振动运动的配分函数
 Q_e : 电子绕核运动的配分函数
 Q_N : 核自旋运动的配分函数
 Q : 固定相中同位素总量
 r : 固定相(湿)球粒半径
 r_0 : 电迁移管半径
 R : 摩尔气体常数
 $\tilde{R}$: $\tilde{R}$ 的转置矩阵
 R^- : 离子交换剂固定基团部分
 $\tilde{R}$: 以内坐标为元的矩阵
 $\dot{R}$: 以内坐标对时间的一阶微商为元的矩阵
 $\tilde{\dot{R}}$: $\dot{R}$ 的转置矩阵
 R_s : 金属离子和配位水之间的距离
 $\overline{R}$: Y—Z 原子的距离
 $\widehat{R}$: 反应总速度 $= k \cdot f([AM] \cdot [BM])$
 R_L : 液膜扩散常数 $= k_F S_0 / \alpha_s$
 R_d : 还原态
 R_e : 雷诺数 $= \frac{r \cdot \bar{V} \cdot \rho}{\mu_0}$
 RM_i : 化学物种 i 在树脂相中的当量浓度
 R_i : 第 i 份流出液中轻同位素的 mol 分数
 R' : BF_3 分子
 s : 对称数, 正整数
 ds : dZ 柱高的体积内的两相接触面
 S_1^1 : 轻同位素 1 对重同位素 2 的单级分离系数
 $S_{(VI)}, S_{(IV)}$: 分别为仅存在 $U(VI)$ 和 $U(IV)$ 时的单级分离系数
 S_{max} : 理想系统具有的最大单级分离系数
 S_n : n 次旋转-反映轴

$\Delta S_p(GF)$: 由同位素效应使 G 和 F 矩阵乘积引起的增量
 $\overline{S}$: 单位柱高的体积内两相接触面
 S_0 : 单位柱体积内的两相接触面, 柱比表面
 S_A^B : B 组份对 A 组份的单级分离系数
 S_e : 分离指数 $= (S_1^1)^N$
 S_{eff} : 有效分离系数
 $(S_1^1)_c$: 冷塔中的单级分离系数
 $(S_1^1)_h$: 热塔中的单级分离系数
 ΔS_{**} : 活化熵
 S : 级数
 S_p : 柱内的总级数
 S_i : $(N_1/N_2)_i / (N_1/N_2)_0$
 t, T_i : 正整数
 $t_{1/2}$: 离子交换半交换期
 $t_{1/2}$: 同位素半交换期
 t_s : 起动时间
 $T_{1/2}$: 半衰期
 T : 绝对温度
 T_A, T_B : A 和 B 壁的绝对温度
 T_k : 分子动能
 T_d : 点群
 U_i : $h\nu_i/kT$
 U_p^{max} : 单位体积单位时间内的最大产量
 U_x, U_M : X 和 M 原子质量的倒数
 $U(V)_T$: 铀区段内 $U(V)$ 的总 mol 浓度
 $U(VI)_T$: 铀区段内 $U(VI)$ 的总 mol 浓度
 u_a : 离心机旋转体线速度
 u_t : 热运动平均速度
 u_s : 逆电场方向的液流速度
 u_E : 离子的淌度
 u_i : i 在电场和逆向液流下的速度
 u_e : 电场引起的平均移速
 u_F : i 的淌度

v_i : 单分子反应速度
 v_r : 反应过程速率
 v_e : 平均电泳速度
 Δv_e : 同位素电泳速度之差
 $\vec{v}$: 空柱线性流速
 $\bar{v}$: 区段推移速度
 V_k : 分子位能
 V_s : 系统所占体积
 V : 有机溶媒分子
 V_c : 阴极区体积
 V_{co} : 柱体积
 ΔV^0 : 标准状态下产物和反应物 mol 体积之差
 $\tilde{V}$: 穿透时的流出液累积体积
 V_t : t 时刻的流出液累积体积
 V_{max} : 流洗曲线出现峰值时的累积体积
 W : 水分子
 W : 尾料
 W_w : 水的重量百分率
 $\vec{W}_G$: G 相的空柱线速度 (m/h)
 $\vec{W}$: 物料的平均体积速度 (m³/h)

$$\vec{W} \cdot F_G / F_s = \vec{W}_G$$
 x : 指定同位素在 L 相 (通常指水相) 中的 mol 分数
 x_0 : 指定同位素在供料中的 mol 分数
 2x : 重同位素在水相中的 mol 分数
 2x_0 : 重同位素在供料中的 mol 分数
 1x_0 : 轻同位素在供料中的 mol 分数
 x_p : 指定同位素在 L 相中达平衡分配时的 mol 分数
 x_e : 富集区端点指定同位素的 mol 分数
 x_d : 贫化区端点指定同位素的 mol 分数
 x_i : 相界面 L 相一侧指定同位素的 mol 分数
 1x_i : 第 i 份流出液中轻同位素的 mol 分数

$\hat{x}(Z, t)$: 在 Z 处、 t 时刻, 同位素物种 1 的 mol 分数
 $\hat{x}^2(Z, t)$: 在 Z 处、 t 时刻, 同位素物种 2 的 mol 分数
 $\hat{x}_0$: 坪区内包括两相在内的同位素物种 1 的平均 mol 分数
 $\hat{x}^i(Z, t)$: 排代区前沿的 $\hat{x}(Z, t)$
 $\hat{x}^i(Z, t)$: 排代区后沿的 $\hat{x}(Z, t)$
 $x_{n, i}$: MX_nF 络合体的 mol 分数
 $\Delta x^{max}(t)$: t 时刻富集区端点以 mol 分数表示的同位素浓度增量
 $\Delta x^{min}(t)$: t 时刻贫化区端点以 mol 分数表示的同位素浓度减量
 x_N : 离开 N 级塔板的 x_L
 $x_B/x_A (x_B/x_A)$: 分离界面上 A, B 两份在固定相 (或液相) 内的 mol 分数比
 x_{Se} : Se 级上的 x
 Δx : 沿 x 轴的位移
 X_p, X_w, X_t : 分别为产品、尾料和供料中 ^{235}U 的浓度
 X : 配位体
 X_L : L 相中同位素 1 对 2 的浓度比
 y : 同位素分子在 G 相中的 mol 分数
 y_p : 同位素分子在 G 相中达平衡后的 mol 分数
 y_i : 相界面上 G 相一侧指定同位素的 mol 分数
 y_N : 离开 N 级塔板的 y_G
 Δy_i : 固定相界面处和本体内指定同位素的 mol 分数之差
 Δy : 沿 y 轴位移
 Y : 配位体
 Y_G : G 相中同位素 1 对 2 的浓度比
 z : 原子价数, 正整数
 Z : 原子序数
 ΔZ : 沿 Z 轴的位移

Z_c : 富集区宽度
 Z_d : 贫化区宽度
 Z^* : 活化络合体
 Z, Z_0 : 床高
 α_0 : 床的空隙系数
 α_1 : 极化率
 α_h : 热扩散系数
 α_{θ} : XMX 夹角
 $\Delta\alpha_{ij}$: 夹角
 α_t : 同一直线上的两个化学键相互作用的力常数
 α_i : 同位素物种 i 的线性分配系数
 β : 有效排代率
 β_{θ} : 对平面 XMX 的 MXZ 夹角
 β_0 : Snyder 公式中的一个指数: $H = H_0(\bar{V})^{\beta_0}(r)^{\gamma_0}$
 β_{MXF}^i : MX_nF 的络合物稳定常数
 β_t : 彼此垂直的两个角的相互作用力常数
 γ_0 : Snyder 公式中的一个指数: $H = H_0(\bar{V})^{\beta_0}(r)^{\gamma_0}$
 γ_{H^+} : 1 摩尔 $Fe(II)$ 因氧化-还原反应生成的 H^+ mol 数
 $\gamma_s(\omega_s)$: $\frac{1}{24}$ 规则中的校正因子
 γ 因子: $|\ln S_2^1|/|\ln S_{max}|$
 Γ : 阴离子交换法中用于还原 $Fe(II)$ 的 $Ti(III)$ 百分率
 δ : 液膜厚
 δ_i : 相位常数
 δ_{θ} : M—X 键离开平面的夹角
 Δ : $\frac{1}{2} \overline{M_{Fe(III)}} \left(\frac{1}{\beta} - 1 \right)$
 Δ' : $\frac{1}{2} k_d M_{Ti(III)}^0 (1 - \Gamma)$
 ε : 富集系数
 ε_t : MX_2 作 β 相分配时贡献的同位素效应

ε_c : 络合反应时贡献的同位素效应
 η : $^1x_0[1 - ^1x_0]/1 + (\alpha_0/K_s)$
 θ_c : 浓度势 $= C - C_p$
 θ_x : 同位素从 L 相到 G 相传质时的推动力 $= x - x_p$
 θ_y : 同位素从 G 相向 L 相传质时的推动力 $= y - y_p$
 θ_m : 平动推动力
 θ_0 : $j = 0$ 时的 θ
 $\bar{\theta}$: 固相中的浓度势
 θ_{θ} : 正角于 XMX 平面上的 MXZ 夹角
 λ_c : 离子在扩散过程中作两次跃迁间的平均距离
 λ_1, λ_2 : 轻、重同位素蒸发热
 $\tilde{\lambda}$: $n_i/g_i \cdot e^{-E_i/kT}$
 λ : 波长
 A : L/G
 μ : 折合质量
 μ_1 : 偶极矩
 μ_0 : 粘度 (g/ml·s)
 ν_i : 振动量子数
 ν_1, ν_2 : $^6Li^+, ^7Li^+$ 相对于流体的移速
 ν : 分子振动频率
 $\Delta\nu$: 频率位移
 $\square$: 产物流量
 ρ : 介质密度
 $\rho_+, \rho_-, \bar{\rho}_+, \bar{\rho}_-$:
 $\rho_+ = \frac{\sum \{U(V)\}}{\sum \{U(N)\}}, \rho_- = \frac{\sum \{U(N)\}}{\sum \{U(V)\}}$
 $\bar{\rho}_+ = \frac{\sum \{U(V)\}}{\sum \{U(N)\}}, \bar{\rho}_- = \frac{\sum \{U(N)\}}{\sum \{U(V)\}}$
 σ : 对称面
 $\sigma_v, \sigma_h, \sigma_d$: 垂直、水平和对角的对称面
 σ_d : 双电层厚度

$\bar{\tau}$: 内扩散过程中的延迟时间

ϕ : 标准化了了的产率 $= \bar{j}/C_1$

Φ : $\frac{1}{2}M_{F(III)}(1-\beta)/M_{U(VI)}$

Φ_0, Φ' : 常数

ψ : $[U(V)]_T/[U(W)]_T$

ψ : $[U(W)]_T/[U(V)]_T$

ω : 波数

ω_s : 全对称伸缩振动频率