

# 1. トリチウムの理工学

編集 東京工業大学原子炉工学研究所 岡本 真実

1-1	核融合炉の概念設計	3
1-1-1	炉心パラメーターと燃料サイクル	3
1-1-2	トリチウムのフローとインベントリー（流れ量と装荷量）	20
1-2	トリチウム取り扱い系統各論	22
1-2-1	増植材／冷却材	22
1-2-2	送・排気用ポンプ類	27
1-2-3	トリチウム精製および水素の同位体分離	31
1-2-4	固体材料中のトリチウムの透過・溶解・拡散	36
1-3	トリチウムの貯蔵	43
1-4	廃棄物の処理・処分	48
1-5	トリチウムによる汚染とその除染	57
1-5-1	汚染と除染	57
1-5-2	緊急用除去装置	66
1-6	トリチウムの製造	72
1-7	トリチウム測定装置	76
1-8	実験室でのその他のトリチウム関連装置・器具等	88
1-8-1	トリチウムガスの分取装置	88
1-8-2	可搬型トリチウム除去装置	93
1-8-3	トリチウム水の電気分解	97
1-8-4	トリチウムターゲット	101
1-8-5	配管・継手類	107

1-9	トリチウムの挙動	111
1-9-1	同位体効果とプラズマ	111
1-9-2	固体中の水素同位体の分布観察法	124
1-9-3	PDP (Plasma Driven Permeation)	130
1-9-4	スワムピング (Swamping)	138
1-9-5	実験室・環境中におけるトリチウムガスのトリチウム水への転換速度	141
1-10	トリチウムガス及びトリチウム水の購入	149

## 2. トリチウムの現行廃棄基準による廃棄方法

編集 京都大学原子炉実験所 石田 政弘

2-1 廃棄業者のトリチウム含有廃棄物の委託廃棄及びその基準	161
2-1-1 液体廃棄物	161
2-1-2 可燃性固体廃棄物	161
2-1-3 不燃性固体廃棄物	161
2-1-4 動物遺体廃棄物	162
2-2 トリチウムの希釈廃棄	162
2-2-1 排水廃棄	162
2-2-2 排気廃棄	163
2-3 トリチウム保管廃棄法	163
2-3-1 アンプル封入法	163
2-3-2 吸湿剤・ビーワックス（密蝋）法	164
2-3-3 硫酸ニッケル法	164
2-3-4 セメント固化法	166
2-4 トリチウム有機廃液焼却法	167
2-4-1 トリチウム有機廃液の処理	167
2-4-2 焼却によるトリチウム有機廃液の処理についての安全指針の適用	167
2-4-3 焼却処理上の留意点	168
2-5 トリチウム含有動物遺体等の廃棄方法	171
2-6 廃棄における問題点	171
2-7 文献	172

### 3. トリチウムのドシメトリー

編集 東京大学医科学研究所 伊藤 彬

3-1	トリチウム生物照射装置（ガンマ線シミュレーター）	178
3-1-1	東京大学方式	178
3-1-2	広島大学方式	182
3-2	マイクロドシメトリーに必要な細胞計測データ集	187
3-3	トリチウムのマイクロドシメトリー	191
3-3-1	トリチウム $\beta$ 線と基準放射線のLET分布	191
3-3-2	線量補正值0.7について	195
3-3-2-a	これまでの計算例	195
3-3-2-b	モンテカルロ計算	198
3-3-2-c	Fe特性X線からの推定	201
3-3-2-d	細胞の含水量からのドシメトリー	203
3-4	トリチウム生物効果の原因（ベータ線，反跳He核）	205
3-4-1	トリチウム水の放射線化学	205
3-4-2	トリチウム水溶液中のDNA切断	210
3-4-3	トリチウム水溶液の生物効果（Kada効果）	219
3-4-4	核変換（transmutation）の役割は？	226
3-5	マイクロドシメトリーとRBE？	231
3-5-1	Rossiの理論（Ellett & Bradyの計算）	231
3-5-2	織田の理論を基礎にした説明	232
3-5-3	トラック構造理論（伊藤の計算）	232
3-6	トリチウムのQ値（線質係数）	236
3-6-1	QF=1.7(1969年以前)の根拠は？	236
3-6-2	Qはどのようにして1になったか？	238
3-6-3	Qは，何故また2になるのだろうか？	240

## 4. トリチウムのRBE（生物学的効果比）

編集 広島大学原爆放射能医学研究所 澤田 昭三

4-1	はじめに	245
4-2	細胞に対するトリチウム水の影響とRBE	245
4-2-1	致死効果	245
4-2-1-A	ヒト細胞	245
4-2-1-B	哺乳類細胞	246
4-2-2	突然変異	248
4-2-3	染色体障害（SCEも含む）	251
4-2-3-A	ヒト細胞	251
4-2-3-B	動物細胞（in vitro）	253
4-2-4	試験管内発癌	257
4-2-5	胚発生	261
4-3	個体に対するトリチウム水の影響とRBE	263
4-3-1	個体死	263
4-3-2	造血障害	265
4-3-3	染色体異常とSCE	269
4-3-4	生殖腺障害	274
4-3-5	奇形	278
4-3-6	発癌	281
4-3-7	突然変異	286
4-3-8	腸上皮	289
4-3-9	胸腺細胞の間期死	291
4-4	トリチウム・チミジンの毒性	293
4-4-1	細胞レベル	293
4-4-2	組織・個体レベル	298
4-5	トリチウム水のRBEの修飾因子	300

4-6	RBEの面から線質係数の検討 .....	305
4-7	まとめ .....	307
4-8	文献 .....	308

## 5. ヒトのトリチウムモニタリング

編集 東京大学アイソトープ総合センター 森 川 尚 威

5-1	トリチウム摂取のスクリーニング	319
5-1-1	呼気テスト	319
5-1-2	尿テスト	322
5-1-3	唾液テスト	322
5-1-4	指テスト	322
5-1-5	血液テスト	324
5-2	トリチウム摂取量の定量測定と実効線量の算出	324
5-3	トリチウム水汚染例	325
5-3-1	#1汚染例	325
5-3-2	#2汚染例	327
5-3-3	#3汚染例	328
5-3-4	#4汚染例(トリチウム水投与マウスに咬まれた傷口よりの汚染例)	328
5-3-5	外国での汚染例	330
5-4	ヒトのトリチウム障害の検出モニタリング系の開発	330
5-4-1	ヒト末梢血リンパ球染色体異常測定法	330
5-4-2	骨髄幹細胞の増殖能テスト	332
5-4-3	骨髄内, 多染性赤血球の小核形成テスト	334
5-5	文献	336

## 6. トリチウムによる人体汚染と、その除去法の開発

編集 茨城大理学部 一 政 祐 輔

京大原子炉 上 野 陽 里

6-1	トリチウム水による人体汚染	339
6-1-1	トリチウム水の口からの摂取	339
6-1-2	トリチウム水蒸気の肺からの吸収	330
6-1-3	トリチウム水蒸気及びトリチウム水の皮膚からの吸収	341
6-2	トリチウムガスによる人体汚染	342
6-3	トリチウム汚染金属等からの皮膚を通しての人体への移行	342
6-4	トリチウムの重度汚染例	344
6-4-1	Seelentag のトリチウム汚染報告例 (含む致死例)	344
6-4-2	上記致死例の解析と再生不良性貧血発症のメカニズムの推測	346
6-4-3	米国における1960年代のトリチウム取扱施設におけるトリチウム汚染報告例	347
6-5	トリチウム汚染人体または汚染動物による研究	349
6-5-1	実効半減期	349
6-5-1-A	外国例のまとめ	351
6-5-1-B	わが国の例	352
6-5-1-C	ICRPの実効線量推定にもちいられる実効半減期	353
6-5-1-D	動物の実効半減期一覧	354
6-5-2	トリチウム汚染の伝達-動物実験よりの推定	354
6-5-2-A	個体より精子(子供)へ	354
6-5-2-B	妊娠母体より胎児へ	355
6-5-2-C	母体より乳児へ	359
6-5-2-D	同室のトリチウム汚染者より非汚染者へ	362
6-5-3	事故時の特殊の場合	363
6-5-3-A	傷口からの汚染	363
6-5-3-B	トリチウム汚染者の医療担当医師と看護婦の汚染による被曝	365



6-6	トリチウム汚染人体よりのトリチウム除去法の開発	366
6-6-1	ボランティアによる例	366
6-6-2	体内トリチウム水の除去促進	367
6-6-3	体内有機結合型トリチウムの除去促進	367
6-7	トリチウム化合物からのトリチウムの生体構成分子への取り込み	368
6-7-1	トリチウム水から	368
6-7-2	トリチウム-アミノ酸から	373
6-7-3	トリチウム-炭水化物から	375
6-7-4	トリチウム-チミジンから	376
6-7-5	トリチウム-含有食品から	376
6-8	文献	379

## 7. 環境におけるトリチウム

編集 九州大学理学部 高島良正

7-1 地球におけるトリチウムインベントリ	387
7-1-1 天然トリチウムの発見と生成機構	387
7-1-2 核実験	388
7-1-3 原子炉, 核燃料再処理, その他	389
7-2 環境トリチウム測定法	390
7-2-1 天然水	391
7-2-1-A 試料の保存法	391
7-2-1-B 標準的測定法	392
7-2-1-C 精密測定法	393
7-2-1-D 簡易測定法	397
7-2-2 大気	397
7-2-3 生物	399
7-2-3-A 組織自由水トリチウム	399
7-2-3-B 組織結合トリチウム	399
7-2-3-C 尿中の水に含まれるトリチウム	400
7-2-4 ヘリウム同位体法による微量トリチウム測定法	400
7-2-4-A 分析試料の調整	400
7-2-4-B ヘリウム質量分析	405
7-2-4-C 測定例	406
7-3 環境トリチウム分布と挙動	408
7-3-1 天然水	408
7-3-1-A 降水	408
7-3-1-B 地下水	413
7-3-1-C 河川水	414
7-3-1-D 湖沼水	415
7-3-1-E 海水	418
7-3-2 大気	423
7-3-2-A 水蒸気状トリチウム (HTO)	423

7-3-2-B	水素状トリチウム (HT)	424
7-3-2-C	炭化水素状トリチウム (CH <sub>3</sub> T)	425
7-3-3	生態系	428
7-3-4	土壌	449
7-4	トリチウムガス (HT) の環境中での酸化・交換反応	431
7-4-1	酸素による酸化反応	431
7-4-2	水との同位体交換反応	432
7-4-3	光化学反応	433
7-4-4	土壌による酸化	433
7-4-5	植物による酸化	434
7-5	被曝線量アセスメントの仕方	435
7-5-1	被曝経路	435
7-5-2	被曝線量計算モデル	435
7-5-3	NCRP モデル	438
7-6	施設放出トリチウムの影響の実例	440
7-6-1	SRP からの大気放出と河川への放出	440
7-6-2	セラフィールド再処理工場	440
7-7	日本人の現在のトリチウムレベルからの被曝線量	441
7-8	トリチウム以外の放射線源による被曝線量とトリチウムとの比較	442
7-8-1	自然放射線	442
7-8-2	核爆発実験	443
7-8-3	原子力施設	444
7-9	文献	445

## 8. トリチウム施設の環境モニタリング

京都大学原子炉実験所 上野陽里

8-1	施設周辺のモニタリング体制	457
8-1-1	日本のモニタリング体制	457
8-1-2	欧米のモニタリング体制の例	457
8-1-3	トリチウム放出と環境トリチウムとの関係	460
8-1-3-a	$^3\text{H}$ 放出強度と施設境界での大気中濃度との関係	460
8-1-3-b	$^3\text{H}$ 放出率と大気水蒸気および降水の $^3\text{H}$ 濃度との関係	461
8-1-3-c	地下水への影響	463
8-1-3-d	植物への影響	464
8-1-3-e	土壌への影響	470
8-1-4	松と松葉, そのユニークな性質と役割	470
8-2	トリチウム放出異常事態例	471
8-2-1	ローレンス・リバモア研究所	472
8-2-1-a	1970年8月6日トリチウムガス 289KCi ( $\sim 1.1 \times 10^{16}$ Bq) 異常放出	472
8-2-2	サバンナ・リバープラント (SRP)	474
8-2-2-a	1974年5月2日トリチウムガス 476KCi ( $\sim 1.8 \times 10^{15}$ Bq) 異常放出	475
8-2-2-b	1975年12月31日トリチウムガス 182KCi ( $6.73 \times 10^{15}$ Bq) 異常放出	479
8-2-2-c	1981年3月27日トリチウム水蒸気 33KCi ( $1.2 \times 10^{15}$ Bq) 異常放出	479
8-2-2-d	1983年7月16日トリチウムガス 56KCi ( $2.1 \times 10^{15}$ Bq) 異常放出	480
8-2-2-e	1984年3月23日トリチウムガス 7.5 KCi ( $2.8 \times 10^{14}$ Bq) 異常放出	480
8-2-2-f	1984年9月2日トリチウム水蒸気 50KCi ( $1.9 \times 10^{15}$ Bq) 異常放出	480
8-2-3	異常放出時の対策のあり方	480
8-2-4	水爆実験のトリチウムの地球環境へのインパクト	481
8-2-5	1986年チェルノブイリ原発事故よりの放出トリチウムの我が国における 検出	483
8-3	トリチウム施設のアセスメント	485
8-3-1	はじめに	485
8-3-2	通常量のトリチウムを取り扱う施設のアセスメント	485
8-3-3	特殊なトリチウム取扱い施設のアセスメント	486

8-3-4 參考資料	487
8-4 文 献	490

## 9. ヒト及びヒト周辺環境のトリチウム

編集 京都大学原子炉実験所 上野 陽 里

9-1	トリチウム測定法	495
9-1-1	トリチウム水の一般的測定法	495
9-1-2	トリチウム水の低レベル測定法	498
9-1-3	有機結合トリチウム(OBT)測定法	500
9-2	飲料水のトリチウムレベル	503
9-2-1	空気	504
9-2-2	飲料水	504
9-2-3	食品	504
9-2-4	外国のデータ	508
9-3	日本人のトリチウムレベル	515
9-3-1	尿・体液	515
9-3-2	各種臓器	516
9-3-3	諸外国例	516
9-4	トリチウムの食物連鎖：トリチウムの濃縮はあるか？	517
9-4-1	トリチウムの摂取経路と濃縮係数の見積り方	517
9-4-2	飲料水→ヒトモデルとしての哺乳類軟組織の経路における比放射能の比 $R_1$ について	518
9-4-3	H <sub>2</sub> O摂取時の体液・組織自由水→組織有機化合物の経路における比放射能の比 $R_2$ について	518
9-4-4	環境水→食物(植物, 魚貝類及びその他の動物等)の経路における比放射能の比 $R_3$ について	519
9-4-5	食物→ヒトモデルとしての哺乳類軟組織の経路における比放射能の比 $R_4$ について	519
9-4-6	トリチウム環境下での水・水蒸気と食物連鎖を介したトリチウムの取り込みにおける濃縮係数 $R$ について	519
9-5	ヒトにおけるトリチウムの代謝モデル	520

9-5-1	代謝モデルの意義	520
9-5-2	2コンパートメントモデル	520
9-5-3	3コンパートメントモデル	521
9-5-4	4コンパートメントモデル (E T Hモデル)	523
9-6	文献	526

# 10. 放射性同位元素‘トリチウム’の放射線防護

京都大学放射線生物研究センター 岡田重文

10-1	放射性同位元素取り扱いの一般的ルールについて	533
10-2	トリチウムの放射線防護のための規制値	534
10-2-1	我が国の新, 旧及び I C R P の規制値の一覧	534
10-2-2	算出の根拠となる I C R P の水素代謝モデル	536
(1)	元素状トリチウム	536
(2)	トリチウム水	537
(3)	トリチウム含有有機化合物	539
10-2-3	規制値の算出法	540
(1)	トリチウム水の年摂取限度 (A L I)	540
(2)	トリチウム水蒸気とトリチウムガスの空气中濃度の最大限度 (D A C)	542
(3)	トリチウム水蒸気とトリチウムガスの排気中の濃度の限度 (D A C) <sub>p</sub>	543
(4)	トリチウム水の排水中の濃度の限度 (D W C) <sub>p</sub>	544
10-2-4	I C R P モデルの問題点 — カナダの考え方を中心に —	545
10-3	我が国における在来の最大許容表面密度	548
10-4	ヒトのトリチウム摂取量, 被曝線量, リスク (放射線障害) との関係	549
10-5	I C R P 及びわが国の標準人 (Reference Man)	552
10-6	トリチウム汚染事故の際, 知るべき‘最少必須情報’ (N C R P, 1980)	557
10-7	文献	559



# 11. トリチウム安全取扱法

—おもに生物実験における—

編集 東京大学アイソトープ総合センター 森 川 尚 威

11-1	トリチウム水取扱施設	565
11-1-1	東北大学医学部ラジオアイソトープセンター	565
11-1-2	東京大学アイソトープ総合センター	568
11-1-3	放射線医学総合研究所	572
11-1-4	広島大学原爆放射能医学研究所	575
11-2	トリチウムガス取扱施設	578
11-3	トリチウム水安全取扱装置	578
11-3-1	トリチウム安全取扱キャビネット等	580
11-3-1-a	東北大学医学部	580
11-3-1-b	東京大学アイソトープ総合センター	581
11-3-2	実験動物飼育装置	584
11-3-2-a	東北大学医学部	584
11-3-2-b	放射線医学総合研究所	588
11-3-2-c	京都大学原子炉実験所	588
11-3-2-d	広島大学原爆放射能医学研究所	591
11-4	トリチウム水取扱基本操作法	593
11-4-1	アンプルの開け方, トリチウム水の取り出し方, 一時保存(貯蔵)の方法	593
11-4-2	移し替えと分注法	596
11-4-3	使用直後のディスプレイピペットまたはチップの扱い方	598
11-4-4	高濃度トリチウム水の放射能測定法	599
11-4-5	後始末および保存廃棄法(アンプル封入)	600
11-5	購入トリチウム水の毒性	600
11-5-1	毒性の本体は $H_2O_2$ ?	600
11-5-2	$H_2O_2$ の処理方法	605
11-5-3	$H_2O_2$ の定量法	609

11-5-4	購入トリチウム水及びH <sub>2</sub> O <sub>2</sub> による生物毒性に関する外国での研究例	610
11-6	トリチウム水による細胞レベル実験法	611
11-6-1	実験法	611
11-6-2	使用トリチウムのインベントリィ（回収量と使用量の比）	611
11-7	トリチウム水による動物実験法	614
11-7-1	急性被曝-短期実験（産業医科大学）	614
11-7-2	急性被曝-短期実験（東京大学アイソトープ総合センター）	617
11-7-3	マウス代謝実験	618
11-7-4	ラット代謝実験	620
11-7-5	動物実験での投与トリチウム水の収支について	621
11-8	トリチウムガスによる動物実験法	623
11-8-1	実験例 1	623
11-8-2	実験例 2	625
11-9	文献	629

# APPENDIX. トリチウムの特性と生成核反応，核融合反応，トリチウム取扱施設例，放射線，放射能の新・旧単位 トリチウム放射能特性

編集 東京工業大学原子炉工業研究所 岡本 真実  
日本原子力研究所アイソトープ部 工藤 博司  
京都大学放射線生物研究センター 岡田 重文

A-1	トリチウムガス	633
A-1-1	原子量	633
A-1-2	水素同位体の天然存在比	633
A-1-3	水素ガスの物理的性質	634
A-1-4	水素同位体の解離定数	634
A-1-5	水素同位体分子間の交換平衡定数	635
A-1-6	水素及び酸素の金属への吸着の雫易	635
A-2	水素と水の交換及び変換反応	636
A-2-1	水素-水系における同位体交換に対する水濃度の影響の計算値	636
A-2-2	$\text{HT} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}_2 + \text{HTO}$ 交換定数	636
A-2-3	トリチウムガスのトリチウム水への変換反応	637
A-3	水の物理的特性	637
A-4	トリチウム生成核反応と関連事項	638
A-4-1	トリチウム生成核反応	638
A-4-2	トリチウム増殖材候補物質	638
A-4-3	中性子照射トリチウム化合物より放出されるトリチウムの化学形	639
A-4-4	中性子照射したトリチウム化合物中(固相)のトリチウム存在状態	639
A-4-5	拡散律速型トリチウム放出過程の拡散係数	640
A-4-6	熱分解律速型トリチウム放出過程の速度定数	640
A-5	核融合反応	641

A-6	富山大学トリチウム科学センター (TRC) 施設	643
A-6-1	施設概略	643
A-6-2	給排気設備	643
A-6-3	グローブボックス	643
A-7	トリチウムの実用単位及び放射線・放射能の新旧国際単位	647
A-7-1	トリチウム実用単位 (g, TU, dpm など) 一覧	647
A-7-2	10単位の整数乗倍の接頭語	647
A-7-3	放射線・放射能の新旧国際単位一覧	648
A-7-4	吸収線量 (グレイとラド) 変換表	648
A-7-5	線量当量 (シーベルトとレム) 変換表	649
A-7-6	照射線量 (クーロン/キログラムとレントゲン) 変換表	650
A-7-7	放射能 (ベクレルとキュリー) 変換表	650
A-7-8	文献	651
A-8	トリチウム水の体内残存相対比の時間経過	651
A-9	トリチウムの放射能特性	652