

Table des matières

Introduction à la collection « Génie Atomique »

Avant - propos	I
--------------------------	---

Chapitre 1 : Introduction aux matériaux pour le nucléaire	1
--	---

1. Le combustible	1
2. Le caloporteur	2
3. Les composants à fonctionnalité nucléaire	2
4. Les éléments de structure	3

Chapitre 2 : Rappels de science des matériaux	5
--	---

1. Les cristaux et leurs défauts	5
2. Microstructures des métaux et alliages	7
3. Les transformations en phases solides	9
4. La déformation plastique des alliages métalliques	11
5. La détermination des propriétés mécaniques des métaux et alliages	14
6. Application à quelques alliages industriels	15
7. La corrosion des alliages métalliques	16
8. Les matériaux à liaisons ioniques : céramiques et ciments	17
8.1. Les céramiques	17
8.2. Les verres	18
8.3. Les ciments	18
9. Les liaisons covalente : les polymères	19

Chapitre 3 : Interactions particules matière et défauts élémentaires	23
---	----

1. Physique des interactions particule–matière	23
1.1. Les photons γ	23
1.2. Les électrons	24

1.3. Les neutrons	24
1.3.1. Réactions nucléaires	24
1.3.2. Interactions élastiques	25
1.4. Les ions lourds	25
2. Le dommage élémentaire	29
2.1. Les ionisations	29
2.1.1. Effets des ionisations sur les matériaux à liaison covalente	29
2.1.2. Effets des ionisations sur les matériaux à liaison ionique	29
2.2. Le transfert d'énergie cinétique et de quantité de mouvement	31
2.3. Le développement d'une cascade de déplacements	32
2.4. Le nombre d'atomes déplacés dans une cascade	33
2.5. Le taux de création de défauts	36
3. L'évolution des défauts ponctuels au cours du temps	37
3.1. Les modes de recombinaison des défauts ponctuels	37
3.1.1. La recombinaison élastique	37
3.1.2. La disparition des défauts ponctuels sur les puits	38
3.1.3. L'agrégation des défauts ponctuels	38
3.2. La cinétique de recombinaison	39
4. Méthodes numériques de calcul des dommages d'irradiation	41
4.1. Calculs par description des collisions individuelles	41
4.2. Techniques de dynamique moléculaire	42
Chapitre 4 : Dommage d'irradiation et microstructure . . .	43
1. L'évolution des défauts ponctuels	43
1.1. Les boucles de dislocations	43
1.2. Les déformations induites par les boucles	44
2. Formation de cavités et gonflement	45
3. Les transports atomiques accélérés par l'irradiation.	46
4. Les déplacements des équilibres thermodynamiques	47
5. Les désordres induits par l'irradiation	48
Chapitre 5 : Applications aux composants des réacteurs . .	51
1. Les éléments de structure	51
1.1. Les aciers de construction et la cuve des réacteurs à eau pressurisée	51
1.1.1. La transition ductile-fragile	52
1.1.2. Les éléments de mécanique de la rupture	54
1.1.3. La fragilisation sous irradiation	54
1.1.4. Les mécanismes de fragilisation	57

1.1.5. Le programme de surveillance	58
1.1.6. Le recuit des cuves	60
1.1.7. Les aciers de cuve du futur	61
1.1.8. Les difficultés rencontrées lors de la fabrication des cuves	61
1.2. Les alliages d'aluminium (effets de transmutation)	63
1.3. Les aciers inoxydables	64
1.3.1. Le durcissement induit par l'irradiation	64
1.3.2. La fissuration intergranulaire	65
2. Effets d'irradiation sur les matériaux utilisés comme modérateurs	67
2.1. La radiolyse	68
2.1.1. La dissociation de la molécule d'eau	68
2.1.2. Le rendement de la radiolyse	69
2.1.3. Les réactions de recombinaison	69
2.2. L'effet Wigner dans le cas du graphite	71
3. Les matériaux absorbants	72
3.1. Les composés au bore	72
3.2 Absorbant en alliage argent-indium-cadmium (AIC).	73

Chapitre 6 : Le combustible

1. Le combustible des réacteurs à eau	75
1.1. Le combustible proprement dit, la céramique nucléaire	75
1.1.1. L'enrichissement isotopique	75
1.1.2. La fabrication des pastilles UO ₂	76
1.1.3. La fabrication des crayons MOX	77
1.1.4. Autres composés d'uranium	78
1.2. Le gainage (alliages de zirconium)	78
1.2.1. Propriétés physiques du zirconium	79
1.2.2. Le développement des alliages	80
1.2.3. L'élaboration des alliages de zirconium	81
2. Comportement des céramiques combustibles sous irradiation	83
2.1. La thermique du combustible	83
2.1.1. Le profil de température dans le crayon	83
2.1.2. Conséquences des distributions de température	84
2.2. Les produits de fission	86
2.3. La sortie des gaz de fission	86
2.3.1. Les mécanismes de sortie des gaz	88
2.3.2. Le taux de Sortie des gaz	90
2.4. La formation du RIM (REP-REB)	90

2.5. Le combustible mixte en REP (MOX)	91
2.6. Les spécificités du combustible RNR	92
3. Comportement du gainage du combustible des réacteurs à eau : cas des alliages de zirconium	95
3.1. La stabilité des phases sous irradiation	95
3.2. La croissance sous irradiation	95
3.3. Les propriétés mécaniques sous irradiation	96
3.3.1. La résistance mécanique	96
3.3.2. Le fluage d'irradiation	98
3.4. La corrosion en réacteur	100
3.4.1. Les mécanismes contrôlant les cinétiques d'oxydation	100
3.4.2. Le comportement global	101
3.5. L'hydruration	102
4. Le gainage des aiguilles combustibles RNR (acier inoxydable)	103
5. Situations dégradées du combustible	106
5.1. La rupture du gainage	106
5.1.1. La corrosion sous contrainte par l'iode	107
5.1.2. Remèdes à l'IPG	108
5.1.3. La corrosion interne dans les RNR	110
5.2. Le comportement des crayons rompus	110
5.3. Aspects sûreté du combustible	111
5.3.1. Dans les REP	111
5.3.2. Dans les RNR	112

Chapitre 7 : Autres matériaux spécifiques pour usages nucléaires

1. Les bétons à usage nucléaires	115
2. Les verres pour le confinement des déchets	116
2.1. L'élaboration des verres de stockage	116
2.2. Le comportement à long terme des verres de stockage	117

Chapitre 8 : Matériaux classiques utilisés en réacteurs

1. Les alliages à base de nickel	119
1.1. Les alliages utilisés pour les tubes de GV	119
1.2. Les contraintes des tubes de GV	120
2. La fatigue thermique des conduites auxiliaires	121
3. La corrosion des aciers ferritiques par l'acide borique	123
4. Évolution structurelle des aciers austénitiques moulés	124

Chapitre 9 : Recommandations et perspectives	127
1. La pérennité de l'industrie nucléaire	127
2. Spécificités de la science des matériaux pour le nucléaire	128
3. Les effets d'irradiation	128
4. Installations en service et évolutions attendues	129
5. Recherche et développement	130
6. Formation et culture scientifique	131
Annexe I	133
Annexe II	135
Annexe III	139
Bibliographie	141
Crédit des illustrations et références associées :	143
Sigles	145
Index	147

