

Commissariat à l'énergie atomique

e-den

Une monographie de la Direction
de l'énergie nucléaire

Le traitement-recyclage du combustible nucléaire usé

La séparation des actinides – Application à la gestion des déchets



EDITIONS
LE MONITEUR



Table des matières

Préface

5

Introduction

La séparation des actinides : une brique majeure de l'électronucléaire durable

7

Propriétés physicochimiques des actinides

Les actinides : une découverte du xx ^e siècle	11
Les radionucléides dans les combustibles nucléaires	13
Les ions aquo des actinides	15
Quelques propriétés d'oxydo-réduction des actinides	19
Cas des actinides majeurs (U et Pu)	19
Cas des actinides mineurs (Np, Am et Cm)	21
Cas des actinides « lourds »	22
Quelques propriétés de complexation* des cations d'actinides	23
Cas de l'hydrolyse	23
Cas général de la complexation en solution aqueuse	26
Cas des ions nitrate	27
Cas des ions peroxy	28
Cas des ions oxalato	28
Conclusion et perspectives	31

Le procédé PUREX

Généralités sur les procédés de traitement	33
Historique	33
Situation française	34
Principe et objectifs du procédé PUREX	34
Mise en œuvre du procédé PUREX	35
Bilan de fonctionnement du procédé PUREX	36
Perspectives d'évolution	36
Quelques caractéristiques des combustibles nucléaires, intéressant leur traitement	37
Les combustibles neufs	37
Les combustibles irradiés	39
Objectifs techniques et contraintes spécifiques du procédé de traitement PUREX	43
Spécifications des produits finis	43
Limitation des rejets dans l'environnement	43
Conditionnement des déchets	44
Contraintes spécifiques	44
Les opérations de tête du procédé PUREX	45
Le cisailage des gaines de combustibles	45
La dissolution du combustible	46
La technologie des dissolvants	47
La stabilité des solutions de dissolution	50
Le traitement des gaz de dissolution	52
La clarification des solutions de dissolution	53
Opérations de séparation et de purification du procédé PUREX	55
Les cycles d'extraction	55
La technologie des appareils d'extraction	60
La modélisation du procédé PUREX. Le code PAREX	66

Élaboration des produits finis dans le cadre du procédé PUREX	71
Voies de conversion en oxyde de l'uranium	71
Voies de conversion en oxyde du plutonium	71
Production du PuO_2 par conversion oxalique dans les usines de retraitement d'AREVA La Hague	72
Gestion et traitement des effluents liquides	75
Effluents liquides aqueux	75
Effluents liquides organiques	76
Les déchets solides du procédé PUREX	79
Classification des déchets PUREX	79
Traitement et conditionnement des déchets de procédés et des déchets technologiques	79
Réduction des volumes et activité (PURETEX)	81
Vers une gestion groupée de l'uranium et du plutonium : le procédé COEX™	83
Coextraire l'uranium et le plutonium : le procédé COEX™	83
Coconversion de l'uranium et du plutonium dans le cadre de COEX™	84

Les cycles du futur

Les options techniques de traitement et de recyclage	87
Les combustibles des réacteurs de génération IV	91
Choix du matériau fissile	91
Combustible pour le réacteur rapide à sodium	92
Combustible pour le réacteur rapide à gaz	92
Combustible pour le réacteur à très haute température RTHT	94
Caractéristiques des combustibles incorporant des actinides mineurs	95
Les procédés de tête de traitement des combustibles avancés	97
Déstructuration des combustibles gainés d'un métal	97
Déstructuration des combustibles gainés d'un composite céramique	98
Dissolution des combustibles avancés	99
Procédés hydrométallurgiques pour les cycles du combustible du futur	101
Introduction	101
La séparation du neptunium	104
La séparation du technétium	107
Stratégies pour la séparation des actinides mineurs Am et Cm par extraction par solvant	108
Vers des relations entre structures et propriétés d'extraction	114
Les procédés de séparation des actinides mineurs Np, Am et Cm	118
Les procédés de séparation du césium	126
La séparation groupée des actinides	128
La conversion des actinides	135
Nouveaux enjeux pour la coconversion des actinides	135
Développement des procédés de coconversion pour les cycles du futur	137
Vers le développement des procédés de coconversion des actinides à l'échelle industrielle	139
La refabrication des combustibles	141
Enjeux et contraintes de la refabrication	141
Spécificités des combustibles incorporant des actinides mineurs	141
Particularité du combustible carbure	142
Avancées des études de R&D	143
Perspectives	145
Les procédés pyrométallurgiques	147
Applications et limitations actuelles de la pyrochimie	147
Potentialités pour le nucléaire du futur	148
Procédés pyrochimiques à l'étude	148

Transmuter les radionucléides séparés ?

Stratégies de gestion des radionucléides	151
Comment transmuter ?	155
Les bases physiques de la transmutation	155
Caractéristiques neutroniques des actinides	156
Efficacité globale de transmutation en réacteurs	158
Bilan en neutrons	159
Conséquences de la transmutation des actinides sur la physique du cœur	160
Les différents modes de recyclage des actinides mineurs	161
Conséquences de la transmutation des actinides sur le cycle du combustible	161
Transmuter les produits de fission à vie longue ?	162
Les expériences d'irradiation en soutien aux développements des concepts de transmutation	163
Les scénarios de séparation-transmutation	165

Conclusion

Conclusion générale	167
Glossaire-index	169