

L'avenir

Back Scattering Spectrometry = spectrométrie par rétrodiffusion). Les ions d'hélium sont les projectiles les plus couramment utilisés, car à des énergies élevées (supérieures à 3 MeV), la diffusion nucléaire résonnante peut être employée pour détecter des photons associés à des molécules cibles contenant des éléments comme le carbone, l'azote ou l'oxygène.

Compte tenu de l'important volume de données disponibles sur les réactions nucléaires à ce niveau d'énergie, l'analyse par activation (détection de traces de divers éléments par irradiation de l'échantillon) peut s'effectuer sur une gamme d'atomes plus étendue avec des particules chargées issues d'accélérateurs qu'avec des neutrons, plus souvent utilisés et qui conviennent mieux aux éléments légers. Les réactions de résonance ont été utilisées pour détecter des traces de métaux comme l'aluminium, le titane et le vanadium.

Les atomes d'hydrogène jouent un rôle essentiel dans les performances de plusieurs classes de matériaux, comme les semi-conducteurs, les isolants et les céramiques. Une sélection judicieuse de l'ion projectile facilite l'analyse de la teneur en hydrogène; la technique se réduit alors simplement à la mesure de l'émission de rayons gamma. Les matériaux photovoltaïques et les verres peuvent être analysés de cette manière.

Sur le plan mondial, de nombreux laboratoires utilisent la technique de l'analyse par faisceau d'ions pour la recherche; des activités considérables sont menées en coopération entre les laboratoires scientifiques et l'industrie, mais seuls quelques laboratoires fournissent un service entièrement commercial.

K. Bethge, Francfort-sur-le-Main, Allemagne

Le développement des accélérateurs de particules doit être rangé parmi les grands succès scientifiques du 20^e siècle. Les progrès des méthodes de calcul, des techniques de l'ingénieur et de la science des matériaux ont tous contribué à rendre disponible aujourd'hui la technologie de précision, hautement développée, grâce à laquelle de petites machines polyvalentes se prêtent à une large gamme d'applications.

Dans le secteur des accélérateurs, des possibilités se font jour pour étendre la gamme des applications industrielles et médicales, en particulier en augmentant les intensités des faisceaux. Dans certains cas, les techniques et les matériaux actuels permettent déjà les avancées technologiques nécessaires.

Médecine

Dans le monde commercial compétitif des produits radiopharmaceutiques, on tend à employer des accélérateurs d'intensité plus élevée, afin de réduire les coûts de production des radioéléments; l'exploitation de ces machines sera soumise à des contrôles radiologiques toujours plus sévères.

Plusieurs fabricants d'accélérateurs mettent au point des machines d'intensité plus élevée, entre 500 et 1000 mA, exigeant des cibles de production mieux adaptées à l'évacuation de la chaleur produite. Une compagnie, IBA en Belgique, a déjà fourni des cyclotrons à ions positifs de 2 mA, 18 MeV, comprenant une cible interne et destinée à la production commerciale d'un nouveau radionucléide thérapeutique, le palladium-103, destiné à la brachythérapie du cancer. Au Canada, EBCO Industries associé à TRIUMF a annoncé la mise au point de l'extraction de 1 mA de leur cyclotron actuel de 30 MeV.

L'industrie de production de radionucléides ouvre de grandes possibilités pour la technologie des accélérateurs. Historiquement, les réacteurs d'essais sur les matériaux ont toujours fourni des radioéléments à l'industrie et aux compagnies

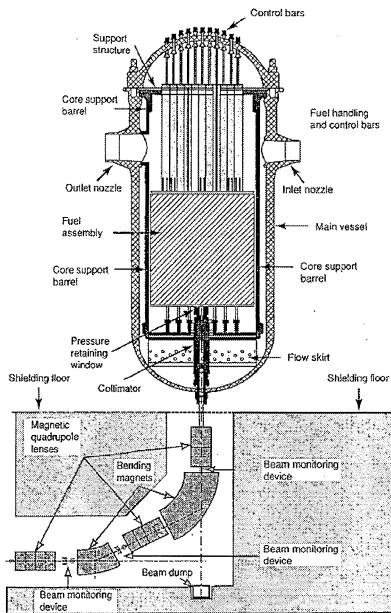
pharmaceutiques à un faible coût; toutefois, nombre de ces réacteurs arrivent au terme de leur exploitation et ne seront pas remplacés.

Le recul de la recherche sur la production d'énergie nucléaire et les essais de combustibles, combiné au problème du stockage des déchets, a réduit l'attrait des réacteurs à fission. Des accélérateurs de haute intensité dotés de cibles appropriées pourraient être construits pour produire les flux de neutrons nécessaires, dans la gamme de 10^{14} – 10^{15} cm⁻² s⁻¹ (par exemple avec des sources à spallation de 500 à 1000 MeV et des intensités de quelques mA). Ne présentant de problème ni de criticité, ni de gestion du combustible, ce type d'accélérateur pourrait remplacer les réacteurs nucléaires dans cette application; jusqu'à présent aucun laboratoire n'a avancé de projet.

Parmi les radionucléides d'usage médical produits aujourd'hui dans des réacteurs, le molybdène-99 reste le plus commun; on l'obtient par fission d'uranium-235 enrichi dans des réacteurs à neutrons thermiques. Récemment, Yves Jongen (IBA) a proposé une source sous-critique intense de neutrons dans laquelle le faisceau de protons de 150 MeV et 1,5 mA d'un cyclotron frapperait une cible en plomb fondu entourée d'eau et d'un réflecteur en graphite pour produire des neutrons de spallation. Ces neutrons de spallation primaires frapperaient des cibles secondaires contenant des quantités sous-critiques d'uranium-235 pour produire un flux de neutrons thermiques allant jusqu'à 2×10^{14} et une puissance de fission dépassant 500 kW. Les fabricants pourraient alors placer leurs propres cibles de production de molybdène-99 dans cette machine et obtenir un produit de qualité radiopharmaceutique sans nécessité d'un réacteur nucléaire. Cette petite installation coûterait nettement moins qu'un nouveau réacteur de recherche.

Le laser à électrons libres (LEL) activé par un accélérateur à l'université Vanderbilt, Tennessee, a été construit pour des applications de recherche en médecine et en biologie. Les premiers résultats sont prometteurs: en ciblant la bande amide II des protéines le rayonnement du LEL pourrait enlever des

Afin de réduire la prolifération de l'uranium et des déchets radioactifs transuraniens à vie longue, on propose de nouvelles idées pour produire l'électricité à l'aide de systèmes de fission pilotés par accélérateur utilisant des combustibles tels que le thorium naturel. Le schéma représente une idée proposée par Carlo Rubbia et ses collaborateurs au CERN consistant à utiliser le faisceau d'un accélérateur pour bombarder un ensemble cible contenant le combustible nucléaire et un modérateur.



tissus sans produire de dommages importants. Le laser à électrons libres pourrait constituer un scalpel caractérisé par sa longueur d'onde ajustable pour la chirurgie de précision.

Production d'électricité

De nouvelles idées de production d'électricité à l'aide de systèmes de fission pilotés par accélérateur ont été proposées pour utiliser des combustibles tels que le thorium naturel. La réussite de la mise en oeuvre de cette technologie pourrait réduire la prolifération de l'uranium et la production de déchets radioactifs transuraniens à vie longue.

Au CERN, Carlo Rubbia et ses collaborateurs ont suggéré l'emploi d'un accélérateur pour produire un faisceau de protons de 1 GeV et 7 mA et bombarder un ensemble cible contenant le combustible nucléaire et un modérateur. Le thorium servirait à produire de l'uranium-233 fissile et à maintenir une production d'énergie

stable. Un conditionnement soigneux du combustible garantirait une exploitation sous-critique avec un flux de neutrons thermiques de $1,0 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$, le prototype d'un tel "amplificateur d'énergie" pourrait produire plus de 100 MW d'électricité. Il est intéressant de noter que le flux de neutrons thermiques de ce dispositif est très proche de celui que demande la production de radio-nucléides.

La proposition originelle avancée par Los Alamos pour une technologie de transmutation par accélérateur comprend un programme de production d'énergie où le thorium sert de combustible dans un assemblage sous-critique.

Le combustible est entouré par un sel fondu de fluorure de lithium-béryllium pour faciliter une exploitation efficace à haute température. L'analyse poussée de Los Alamos a souligné non seulement les exigences extrêmes imposées à l'accélérateur de haute énergie mais également aux matériaux employés. Des programmes d'étude similaires sont en cours dans des laboratoires au Japon, en Russie et ailleurs.

La production d'électricité par fusion avec confinement inertiel constitue une autre possibilité et plusieurs groupes de spécialistes des accélérateurs étudient les conditions de la réaction deutérium-tritium usuellement considérée, la réaction du proton avec le bore-11 demande également à être étudiée. La conception des pastilles de combustible pourra tirer parti des premières études effectuées à l'aide de lasers, mais pour pousser la température au-delà du critère de Lawson — 10 MJ en moins de 15 ns — il faudra un système d'accélérateur aux performances extrêmes. Le laboratoire GSI, Darmstadt, a déjà effectué des études préliminaires sur un système linac-anneau de stockage.

L'environnement

En permettant la transmutation des déchets nucléaires, la technologie des accélérateurs pourrait être bénéfique dans la gestion de l'environnement planétaire.

Les combustibles nucléaires épuisés contiennent des déchets hautement radioactifs, dont divers isotopes d'actinides à vie longue et d'autres produits de fission à vie longue tels que l'iode-129 (période $1,6 \times 10^7$ ans). Leur stockage reste un sujet de préoccupation grave pour le public et les politiciens. La transmutation des déchets par accélérateur pourrait offrir une solution.

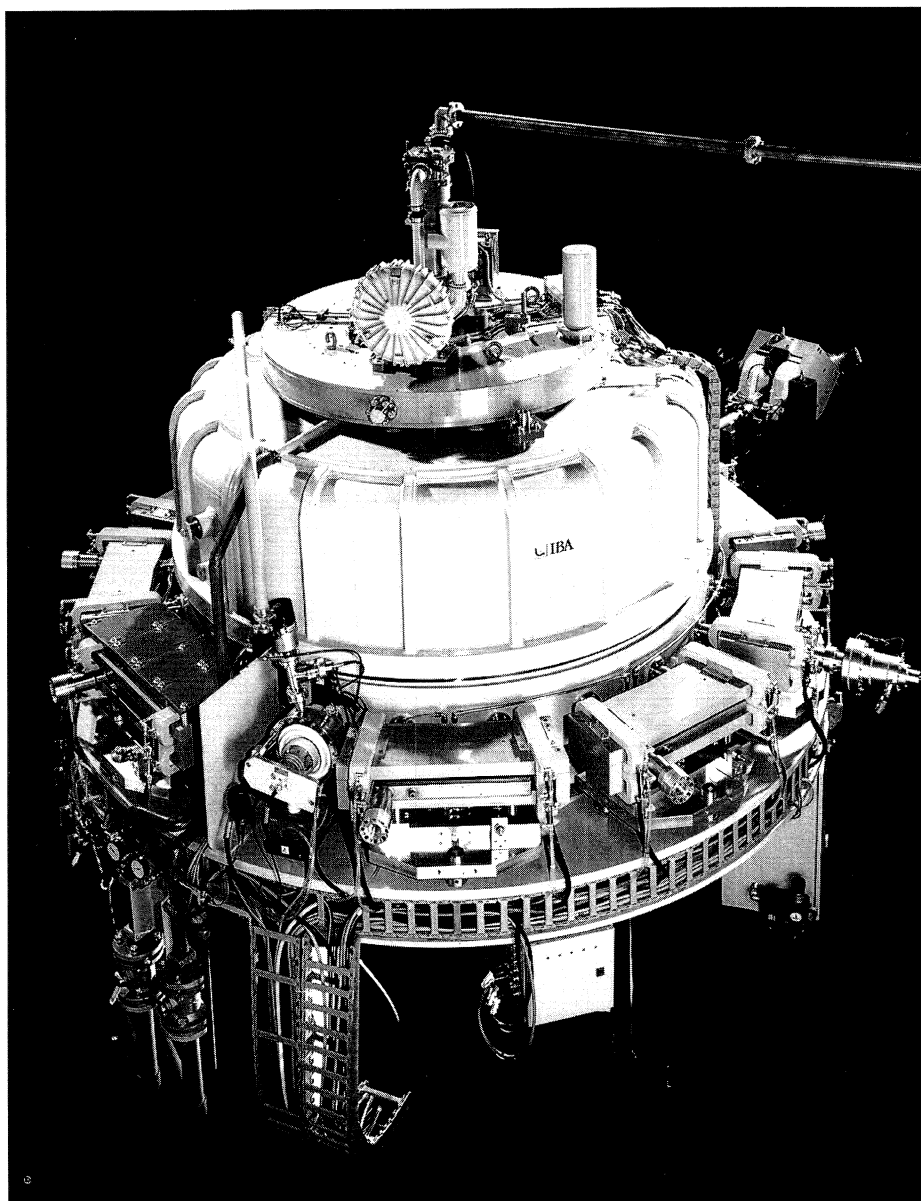
Le concept proposé par Los Alamos demande un faisceau de protons ou de deutons de 100 à 200 mA et pouvant atteindre 1,6 GeV.

L'interaction avec une cible de spallation engendre jusqu'à 50 neutrons rapides par particule incidente; ils restent confinés dans une couverture modératrice. Le flux élevé de neutrons — $10^{16} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ — est thermalisé pour produire un flux de neutrons thermiques suffisant pour transformer des actinides tels que le neptunium-237 (période $2,1 \times 10^6$ ans) en neptunium-239 fissile et le produit de fission technicium-99 (période $2,1 \times 10^5$ ans) en ruthénium-100 stable.

Les sources de neutrons activées par accélérateur permettent la transmutation de la plupart des radionucléides à vie très longue mais l'accélérateur lui-même et son exploitation seront inévitablement très coûteux.

Des accélérateurs plus petits peuvent également être utiles pour l'environnement; cette application reste encore limitée, mais les méthodes chimiques deviennent moins attrayantes et plus chères. La technologie des accélérateurs peut trouver des applications dans le traitement de l'eau et des déchets, la stérilisation des boues et le traitement des gaz de combustion dans les grands centres industriels. L'élimination des pathogènes et des toxines ouvre des possibilités attrayantes pour la recherche sur l'environnement à l'aide de petits accélérateurs.

Cet accélérateur à faisceau d'électrons de 10 MeV et 10 mA (le Rhodotron) est un exemple d'une nouvelle génération de machines conçues spécifiquement pour les futurs utilisateurs industriels, dans ce cas pour des applications comme l'ionisation industrielle et la stérilisation.
(Photo IBA, Louvain-la-Neuve, Belgique)



Rédacteur sur invitation

Ce numéro spécial du *Courrier CERN* sur les applications des accélérateurs a été réalisé sous la houlette de notre rédacteur sur invitation Dewi M. Lewis, d'Amersham International srl (Royaume-Uni).

M. Lewis a fait ses études au Département de physique de l'Université du Pays de Galles, Swansea, puis il s'est spécialisé en physique des accélérateurs en tant qu'ingénieur en charge aux Anneaux de stockage à intersections du CERN avant d'opter pour l'industrie, en 1979, lorsque s'amorçait l'explosion commerciale du cyclotron. Ayant mené à bien l'installation des deuxième et troisième cyclotrons de production de radionucléides d'Amersham au Royaume-Uni, il compte à son actif une expérience industrielle allant de la fabrication de radionucléides à l'administration d'une société de radiopharmaceutiques en passant par le lancement de coentreprises. A la suite de la fermeture de plusieurs réacteurs de recherche en 1990, ses responsabilités se sont étendues à la production de radionucléides dans des réacteurs, ainsi qu'au transfert de technologie entre les laboratoires internationaux et l'industrie. C'est sous sa direction que s'est créée la première coentreprise russe «Weapons to ploughshares» orientant l'industrie militaire vers des objectifs pacifiques avec la Radioisotope Association, Mayak et le Ministère russe de l'Energie atomique. Aujourd'hui, M. Lewis préside le Comité européen de l'industrie radiopharmaceutique sur les radionucléides à produire à l'avenir dans les réacteurs et participe à la mise au point des techniques des accélérateurs destinés à l'industrie.

Amersham International figure parmi les entreprises les plus avancées dans le monde pour l'élaboration des radionucléides et travaille à la mise au point, la fabrication, la vente sur les marchés internationaux et la distribution de radioéléments utilisés en médecine, dans la recherche et l'industrie. Autrefois rattachée