

allen näher Beteiligten als besonders bitter empfunden worden, daß *Lise Meitners* im Juli 1938 durch politische Ereignisse erzwungener Abschied vom Institut, der sie zunächst nach Kopenhagen und schließlich nach Stockholm führte, ihr den greifbar nahen Erfolg, die Deutung der Ergebnisse der letzten Jahre, die wenige Wochen später möglich wurde, aus der Hand genommen hat.

Aber ihre Arbeitskraft blieb ungebrochen und in kürzester Frist hat sie gemeinsam mit *O. Frisch* als erste die physikalische Bestätigung der Uran-Spaltung gebracht und eine Schätzung der dabei freiwerdenden Energie vorgenommen. Mehrere Angebote zu gemeinsamer Arbeit mit englischen und amerikanischen Kollegen lehnte sie ab und arbeitete in Stockholm im *Siegbahnschen* Institut über

Einfangquerschnitte langsamer und schneller Neutronen an schweren Elementen. Es ist eine bewundernswerte Bilanz der erfolgreichen Arbeit, auf die sie an ihrem 75. Geburtstag zurückblicken kann und ihre Arbeiten geben ein Bild von der Entwicklung der Kernphysik.

Ihre Freunde haben es alle mit ehrlicher Freude begrüßt, daß sie nun wieder die Ruhe und Sicherheit der Arbeit genießt, die für den Forscher unerläßlich notwendig ist und in die Gedanken, die wir ihr widmen, darf sich die Genugtuung darüber mischen, daß selbst in Zeiten schwerster Belastung dieses glänzende Bild einer Forscherpersönlichkeit von der menschlichen Seite her nicht nur keine Beeinträchtigung erlitt, sondern in vorbildlicher Weise ergänzt wurde.

F. Strassmann

Die Gewinnung von radioaktiven Isotopen in der Pile

Von Dr. HENRY SELIGMAN

Leiter der Isotopen Division, Atomic Energy Research Establishment,
Harwell, England

Die Uran-Pile ermöglicht durch ihre starke Produktion an thermischen und schnellen Neutronen den Neutronenbeschuß zahlreicher Substanzen. Möglichkeiten und Grenzen des Verfahrens sowie insbes. die Herstellung und Reinigung von ^{32}P , ^{131}I und Tritium werden ausführlich dargelegt. Die Trennung von Uranspaltprodukten wird beschrieben.

Künstlich hergestellte Radioisotope sind nicht neu. Schon einige Jahre vor dem letzten Krieg, seitdem man teilchenbeschleunigende Maschinen hatte, konnte man im Laboratorium Radioisotope herstellen, die es nicht in der Natur gibt. Diese Maschinen, z. B. Cyclotrone, können aber nur wenige Isotope gleichzeitig herstellen, und die Gesamtaktivitäten bleiben verhältnismäßig klein. Außerdem war die Instrumententechnik noch nicht so weit fortgeschritten, und primitive Meßinstrumente mußten in den eigenen Laboratorien hergestellt werden.

Dieses Bild änderte sich grundsätzlich mit den erfolgreichen kernphysikalischen Studien während des Krieges, die in der Herstellung der ersten Pile¹⁾ in Chicago am 2. Dezember 1942 kulminierten. Nun auf einmal war man im Besitz von einem Koloß, der als Nebenprodukt freie Neutronen in ungeheurer Menge schuf. Die wichtigste Vorbedingung, um Radioisotope in die Medizin, Wissenschaft, Technik und Industrie einzuführen, war somit geschaffen. In England wurde daraufhin alles getan, um diese Isotope schnell und verhältnismäßig billig herzustellen und ohne alle unnützen Beschränkungen auch anderen Ländern zugänglich zu machen. Harwell erfüllt zur Zeit mehr als 11000 Aufträge für Radioisotope im Jahr. 35 Länder werden zur Zeit mit diesen Materialien von England aus versorgt. Es sei hinzugefügt, daß auch die Industrie in den verschiedenen Ländern viel getan hat, um die nötigen Meßinstrumente herzustellen und sie preiswert auf den Markt zu bringen.

Warum nun ist die Pile ideal, um große Mengen radioaktiver Stoffe gleichzeitig herzustellen, welches sind ihre Beschränkungen und welche Kernreaktionen sind die günstigsten?

Unsere „orthodoxe“ Pile in Harwell besteht aus Graphit und Uran-Metall, in natürlicher Zusammensetzung.

¹⁾ Der Autor glaubt, daß ein Neutronen gebärendes Aggregat, das eine sensitive, temperamentvolle Maschine ist, nicht mit dem männlichen Artikel versehen werden kann. (Die häufige Verwendung des männlichen Artikels geht wohl darauf zurück, daß zunächst „pile“ mit „Meller“ übersetzt wurde).

Ihr Neutronenfluß ist gegeben durch die Menge des Urans, die Bauart des Aggregats, die Kühlvorrichtungen (diese Pile ist luftgekühlt) und andere technische Einzelheiten. Der derzeitige Maximalfluß in der Mitte der Pile ist $2 \cdot 10^{12}$ Neutronen/cm²/sec. Die Verteilung des Neutronenflusses in der Pile zeigt Bild 1.

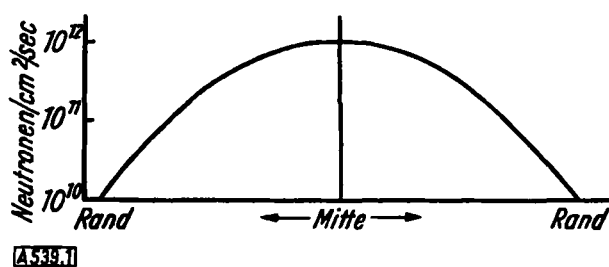


Bild 1
Verteilung der Neutronendichte in der Pile

Schon daraus kann man ersehen, daß es sehr schwer ist, den Neutronenfluß genau vorauszusagen. Hinzu kommt, daß die Pile manchmal während der Woche mit reduzierter Leistung läuft. Auch hat die Luftkühlung einen Einfluß auf die Leistung der Pile. Bei erhöhter Temperatur werden mehr Neutronen im Uran-Resonanzgebiet weggefangen, gehen also für die Uran-Spaltung verloren. Schließlich müssen wir die Absorptions- und Selbstabsorptionsmöglichkeiten durch Materialien mit verhältnismäßig hohen Wirkungsquerschnitten, die in der Pile bestrahlt werden, berücksichtigen. Dies sind keineswegs kleine Korrekturen, sondern außerordentlich hohe Beträge. Bild 2 zeigt die gemessene Selbstabsorption eines kleinen Kobalt-Zylinders, der einen Durchmesser und eine Höhe von 12 mm hat. Im Innern des Zylinders geht der Neutronenfluß auf 58% zurück. Dies ist eine erhebliche Reduktion, besitzt doch Kobalt vergleichsweise gar keinen so großen Wirkungsquerschnitt und ist die Menge an Kobalt in diesem

Fall ziemlich klein. Es gibt z. B. Stoffe, die 100-, ja 1000-mal größere Wirkungsquerschnitte haben. Als Beispiel sei angeführt: In einem dem Kobalt benachbarten Kanal befanden sich größere Mengen Gold zur Bestrahlung. Obwohl das Gold beinahe 50 cm vom Kobalt entfernt war,

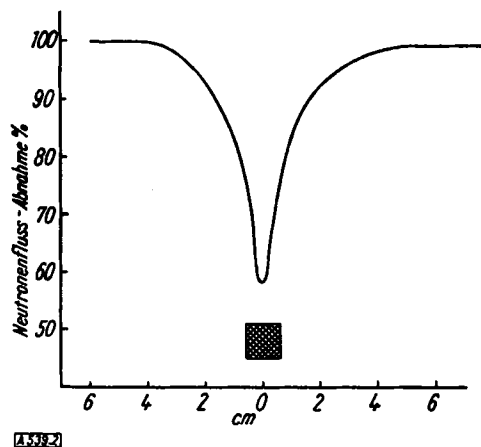


Bild 2

Abnahme der Neutronendichte in der Nähe eines Kobalt-Cylinders (Höhe 12 mm, Durchmesser 12 mm) in der Pile

erhielten unsere Co-Cylinder nur 50% der berechneten Aktivität. Um derartige Vorkommnisse zu vermeiden, haben wir einen Spezialisten, der auf solche Absorptionserscheinungen achten muß.

Warum ist nun der Neutronenfluß in vielen Fällen so wichtig?

Die Aktivität (Zerfälle/sec) eines bestrahlten Materials ist gegeben durch die Gleichung:

$$A = F \cdot \sigma \cdot N (1 - e^{-0.693t/T})$$

worin F der Neutronenfluß,
 σ der Wirkungsquerschnitt für langsame Neutronen,
 N die Anzahl der bestrahlten Atome,
 t die Bestrahlungszeit und
 T die Halbwertszeit bedeuten.

Alle diese Größen sind entweder Konstanten oder können nur in begrenzten Rahmen variiert werden. Die einzige Variable, die die spezifische Aktivität bedeutend erhöhen kann, ist eben der Neutronenstrom.

Für viele Bestrahlungen ist der Neutronenfluß unserer derzeitigen Pile groß genug, aber es gibt eine Anzahl Ausnahmen. Die wichtigsten mögen hier erwähnt sein:

^{60}Co für γ -Radio-Therapie
 ^{60}Ni , ^{59}Fe , ^{45}Ca , ^{51}Cr und einige andere.

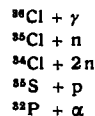
Für das Kobalt gibt es z. Zt. keine Möglichkeit, die Aktivität mit anderen Mitteln anzureichern. Für Fe, Ca und Cr dagegen hat man einen Ausweg gefunden, der später erwähnt wird.

Zur Bestrahlung in der Pile können über 400 dazu geeignete Löcher verwendet werden. Sie befinden sich in Graphitstangen und können mit Aluminium-Kapseln besetzt werden, in die das zu bestrahlende Material eingefüllt wird. Die Graphitstangen können nur beladen und entladen werden, wenn die Pile abgeschaltet ist. Jeden Montag wird morgens eine Bestrahlungsserie begonnen. Für kürzere Bestrahlungen als eine Woche haben wir Selbstbedienungslöcher, die auch besickt werden können, während die Pile arbeitet. Außerdem gibt es kleine Graphitbehälter in Schlaufenanordnung, die auch verwendbar sind. Diese Pile ist eine Idealpile zur Isotopenerzeugung. Bei einigen künftigen Pilen, die einen viel höheren Neutronenfluß haben werden, wird das Beladen und Entladen zu Bestrahlungszwecken viel schwieriger sein. Der Grund

hierfür ist erstens das kleinere Gesamtvolumen der Pile, da entweder D_2O als Moderator benutzt wird oder aber ^{235}U -angereichertes Uran verwendet wird.

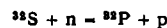
Mit welcher Art Neutronen haben wir es in der Pile zu tun und welche Reaktionen sind zur Isotopenerzeugung günstig?

Bei der Kernspaltung werden schnelle Neutronen frei. Im Graphit werden sie gebremst, und wir haben also ein Gemisch von schnellen und langsamen Neutronen im Verhältnis etwa 1:1. Außerhalb des „Core“ finden wir überwiegend langsame Neutronen. Die günstigste Reaktion in der Pile ist die n, γ -Reaktion. Sie wird induziert von thermischen Neutronen. Oft treten aber auch andere Reaktionen gleichzeitig ein. Wenn z. B. ^{36}Cl bestrahlt wird, so kann das entstehende ^{36}Cl folgendermaßen zerfallen:



Daher treten oft radioaktive „Verunreinigungen“ auf und der Isotopenverbraucher muß dies berücksichtigen.

Sind die erzielten spezifischen Aktivitäten zu klein, so kann man zuerst einmal die gewünschten Isotopen chemisch anreichern, falls das aktive Endprodukt ein anderes Element darstellt als das bestrahlte Material. Dies ist möglich bei der n, p -Reaktion, und man kann vorausberechnen, ob sie in einem bestimmten Fall stattfindet. Trägerfreies ^{32}P wird z. B. durch Bestrahlung von ^{32}S gewonnen:



Die Massen auf der rechten Seite der Gleichung sind 0,001 Masseinheiten größer als auf der linken Seite; dies entspricht 0,9 MeV. Daher benötigt man für diese Reaktion schnelle Neutronen, die aber reichlich im Inneren der Pile vorhanden sind.

Um den Schwefel in einem höheren Neutronen-Strom zu bestrahlen, entleerten wir den mittleren Uran-Kanal im Pile und füllten ihn mit Schwefel. Die ^{32}P -Ausbeute war jedoch viel geringer, da durch die Wegnahme des Urans die Anzahl der schnellen Neutronen sank. Der Neutronenfluß zwischen zwei U-Stangen in der Pile ist in Bild 3 dargestellt.

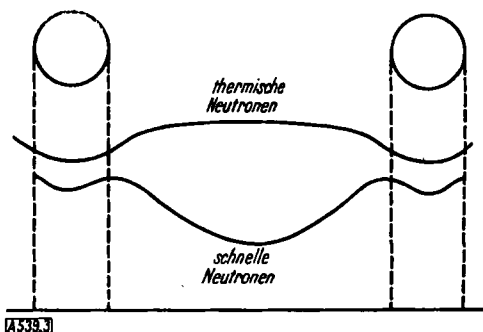


Bild 3

Schema der Neutronenverteilung zwischen zwei Uran-Stäben. (Nach Whitehouse u. Putman: Radioisotopes; Clarendon Press, Oxford 1953)

Wenn nun eine Uran-Stange wegfällt, so wird die Zahl der schnellen, ungebremsten Neutronen stark reduziert.

Wie kann man nun aus einem bestrahlten Schwefel-Block den ^{32}P trägerfrei extrahieren? Es ist notwendig, ungefähr 10^{-6} g radioaktiven Phosphor von 100–1000 g Schwefel und seinen chemischen Verunreinigungen zu trennen. Der Schwefel wird zunächst in verdünnter Salpetersäure aufgelöst. Die eigentliche Reinigung beginnt sodann

mit einer alkalischen Lanthanhydroxyd-Fällung, die den Phosphor enthält, aber keinen Schwefel. Durch HBr-Einwirkung und Verflüchtigung des Tribromids wird das Arsen beseitigt. Kationen werden an der Ionenaustauschkolonne festgehalten und organische Verunreinigungen werden schließlich durch Erhitzen einer sauren Lösung mit Wasserstoffsperoxyd zerstört.

Die n,p-Reaktion benötigt nicht immer schnelle Neutronen. Die Herstellung von ^{14}C aus ^{14}N verläuft mit thermischen Neutronen. Da die Halbwertszeit des ^{14}C sehr groß ist, ist die Ausbeute jedoch gering. Nach der Pilebestrahlung kann man verhältnismäßig einfach chemisch trennen. In England bestrahlt man AlN und das ^{14}C wird als Dioxyd in $\text{Ba}(\text{OH})_2$ aufgefangen. Zahlreiche organische Verbindungen mit eingebauten ^{14}C -Atomen wurden in Amersham synthetisiert, so daß heute dem organischen Chemiker über 100 Verbindungen zur Verfügung stehen. Die Synthesen beruhen auf bekannten organischen Synthesemethoden, nur muß natürlich genau darauf geachtet werden, daß der ^{14}C -Gehalt während der Umsetzungen nicht zu sehr mit ^{12}C verdünnt wird.

In einer kürzlich erschienenen Veröffentlichung wird darauf aufmerksam gemacht, daß viele ^{14}C enthaltende Verbindungen weniger beständig sind, als man bisher annahm⁹⁾. Man hatte den zu erwartenden Zerfall durch die Ionisationswirkung der β -Strahlen des ^{14}C berechnet, aber Beobachtungen zeigten, daß ein bis zu 150mal größerer Zerfall eintreten kann.

Die n, α -Reaktion wird benutzt, um das so wichtige Tritium herzustellen. Diese Reaktion verläuft mit langsamen Neutronen, indem Lithium bestrahlt wird. Die Abtrennung des gasförmigen Tritiums ist verhältnismäßig einfach. Man erhitzt das Tritium-haltige Lithium in einem Ofen, und etwas ^3He , in das das Tritium zerfällt, entweicht zusammen mit dem Tritium und wird an Uran-Spänen absorbiert. Durch Erwärmen der Uran-Späne kann das Tritium wieder befreit werden.

Tritium-wasser wird mehr und mehr in Wissenschaft und Technik benutzt. Die Herstellung ist einfach, obgleich die naheliegendsten Synthesen nicht benutzt werden können, denn 1 ml Tritium besitzt 2,65 Curies. Wenn auch die β -Energie gering ist, muß man doch vorsichtig sein. Die üblichen Methoden, Wasserstoff in Sauerstoff zu verbrennen, indem man entweder erhitztes Platin oder aber erhitzte Kupferoxyde zur Hilfe nimmt, haben wir als zu gefährlich abgelehnt. Wir verwenden stattdessen die Diffusion durch eine erhitzte Palladium-Röhre und darauffolgende katalytische Oxydation in einer Sauerstoff-Atmosphäre. Andere vorhandene Gase stören nicht, da sie nicht durch das Palladium diffundieren können. Wichtig ist, daß man mit geringen spezifischen Aktivitäten arbeitet, da man sonst Bestrahlungszerstörung erhält, die wegen der damit verbundenen Drucksteigerung gefährlich werden können. Außerdem muß der Sauerstoff-Druck unter 20 cm Hg (Explosionsgrenze) belassen werden. Wir fanden, daß 200 mc/ml eine gute Vorratslösung sind, obwohl natürlich größere Konzentrationen leicht erhältlich sind.

Für chemische Trennungen ist die n, γ -Reaktion mit nachfolgendem β -Zerfall wichtig. Diese Reaktion besitzt größte Bedeutung für die Herstellung des in der Medizin so wichtigen Radiumjods. ^{130}Te , welches in ^{131}Te übergeht, zerfällt zu ^{131}I . Man hat es hier also mit einer Trennung des Jods vom Tellur zu tun. Das Tellur wird in einer oxydierenden Mischung aufgelöst, welche das Jod in Jodat verwandelt. Durch Zugabe von Oxalsäure wird das Jodat zu Jod reduziert, dieses sodann in eine alkalische Lösung

von SO_2 überdestilliert und so Alkalijodid erhalten. Zur Reinigung wird nochmals mit Permanganat oxydiert, wieder mit Oxalsäure reduziert und erneut in alkalischer SO_2 -Lösung destilliert (vgl. Bild 4).

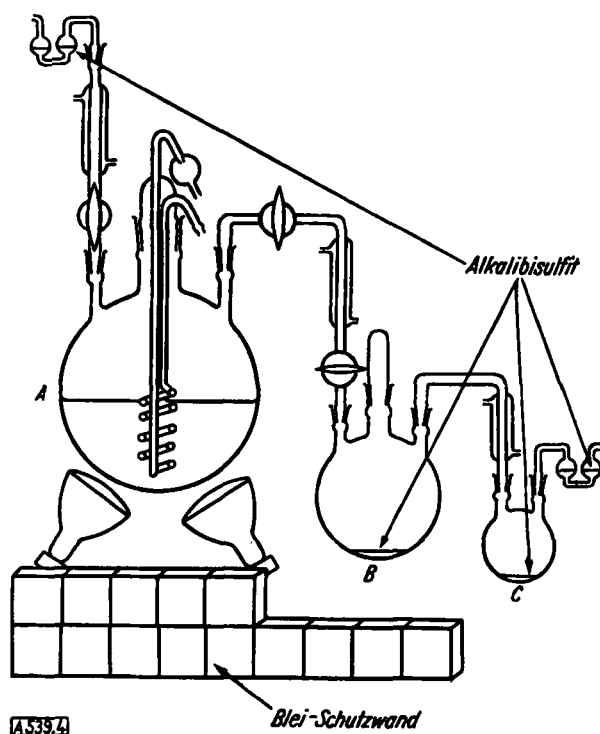


Bild 4
Apparatur zur Herstellung von ^{131}I aus bestrahltem Tellur. Im Kolben A wird die bestrahlte Substanz oxydierend gelöst und das Jod nach Reduktion in B überdestilliert. Zur Reinigung folgt weitere Destillation in den Kolben C (vgl. Text)

Wie der Radiophosphor wird das Jodid anschließend gemessen und spektralanalysiert, um sicher zu sein, daß kein inaktiver Giftstoff anwesend ist, da Jod und Phosphor hauptsächlich für medizinische Zwecke gebraucht werden. In diesem Falle muß man auch sicher sein, daß sehr wenig Trägerjod vorhanden ist, da dieses das Radiojod für medizinische Zwecke unbrauchbar machen würde.

Es ist möglich, daß dieser Prozeß, der während der letzten 5 Jahre benutzt wurde, durch ein Verfahren ersetzt wird, bei dem Telluroxyd bestrahlt und durch Erhitzen und darauffolgendes Abspumpen das Jod abgetrennt wird. Dabei bliebe das Telluroxyd für weitere Bestrahlungen benutzbar.

Die Trennung der Uran-Spaltprodukte ist gleichbedeutend mit einer Anreicherung von Radioaktivitäten. Sie erleichtert zudem das Problem der Beseitigung der Abfallprodukte einer Plutonium-Produktionsanlage. Hier müssen wir die kurzlebigen von den langlebigen Isotopen unterscheiden. In den USA wird das Radiojod aus kurz bestrahltem Uran-Metall gewonnen. Auch in England wurde erfolgreich versucht, trägerfreies Jod so zu gewinnen. Der große Vorteil gegenüber der Tellur-Bestrahlung ist der, daß man viel Platz in der Pile spart, wenn diese Kilogramm-Mengen Tellur nicht bestrahlt werden müssen und das Jod von einer kleinen Uran-Stange gewonnen werden kann, die zudem noch andere nützliche kurzlebige Spaltprodukte, wie $^{138}\text{Xenon}$, $^{140}\text{Barium}$ und $^{140}\text{Lanthan}$ ergibt.

Bei diesem Prozeß wird Uran, das vielleicht einen Monat in der Pile war, 10 Tage nach dem Herausnehmen in Salpetersäure aufgelöst. Das Jod wird dann herausdestilliert und in einer alkalischen Lösung aufgefangen. Da aber die

⁹⁾ R. M. Lemmon, Nucleonics 11, 44, Okt. [1953].

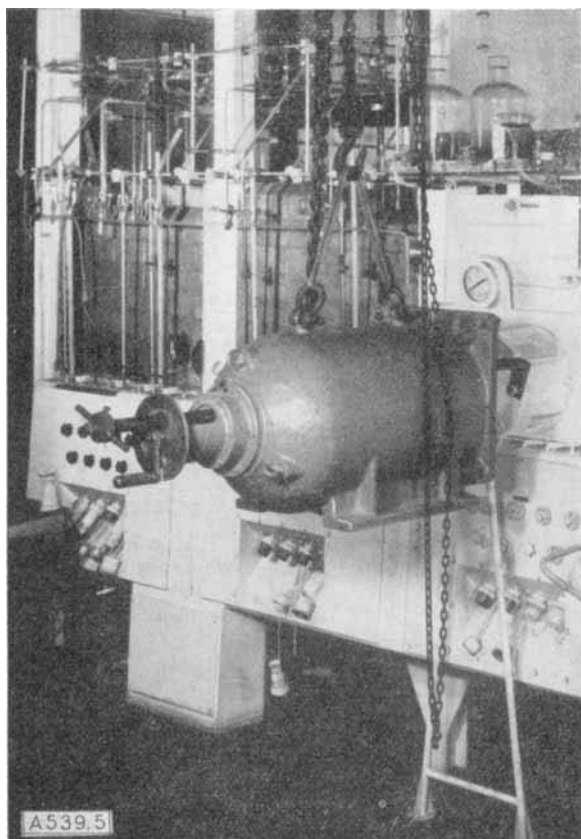


Bild 5

Anlage mit Strahlenschutz zur Abtrennung von Isotopen (insbes. ^{131}J) aus hochaktiven Uran-Stäben. Im Vordergrund, an Flaschenzug hängend, Transportbehälter für Uran-Stab

Uran-Stäbe kurzlebige Spaltprodukte mit harten γ -Strahlen enthalten, so sieht diese Anordnung viel technischer aus als die der vorher besprochenen Trennungen. In dem Uran-Stab liegen vor der Aufarbeitung 100 oder mehr Curies vor (vgl. Bild 5).

Von den langlebigen Spaltprodukten sind am wichtigsten Strontium, Cer und Caesium. Sie werden hauptsächlich von der Industrie, das Caesium vielleicht in Zukunft auch in der Medizin als Strahlentherapie-Quelle, benutzt werden.

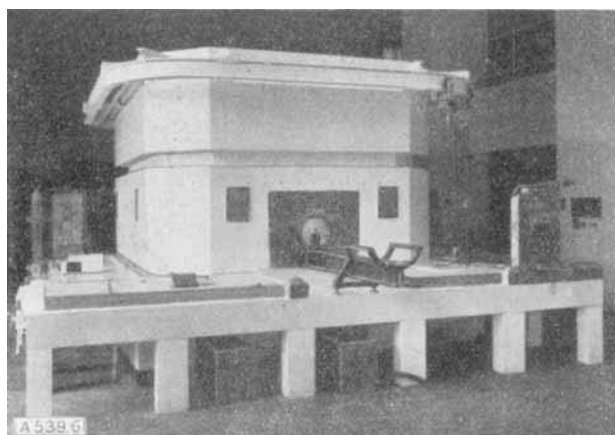


Bild 6

Gesamtansicht des Aufbewahrungsblockes für radioaktive Substanzen. In der Mitte des Blockes sind die Öffnungen der Rohre erkennbar, in denen die radioaktiven Substanzen aufbewahrt werden, bzw. in welche das zu bestrahlende Material eingeführt werden kann. Um den gesamten Block läuft eine elektrische Bahn, mit der radioaktive Präparate befördert werden

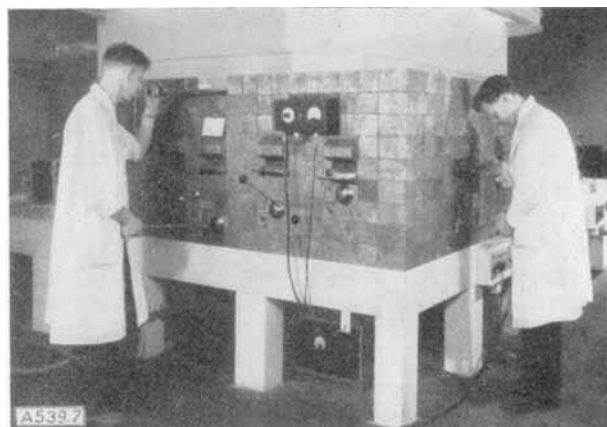


Bild 7

Bleiwände mit Manipulationsvorrichtungen am Aufbewahrungsblock für radioaktive Substanzen in Harwell. Die Experimentatoren verfolgen ihre Arbeit mit Hilfe von Spiegeln

Die langlebigen Produkte sind fast ausschließlich β -Strahler und daher leichter zu verarbeiten. Zu ihrer Trennung kann man im allgem. zwei Wege gehen. Entweder verwendet man fast ausschließlich Ionenaustausch-Kolonnen, oder aber man benutzt die üblichen chemischen Trennungswege, in einigen Fällen mit Hilfe von Träger-substanzen. In England wird z. Zt. in Amersham der zweite Weg beschritten. Erstaunlich ist, daß man oft keine Trägersubstanzen hinzuzufügen braucht, da eine Reihe von Spaltprodukten schließlich in einem nichtaktiven Element enden. Das ist z. B. der Fall beim Caesium. Die natürliche Verdünnung mit nichtaktivem Caesium ist schon

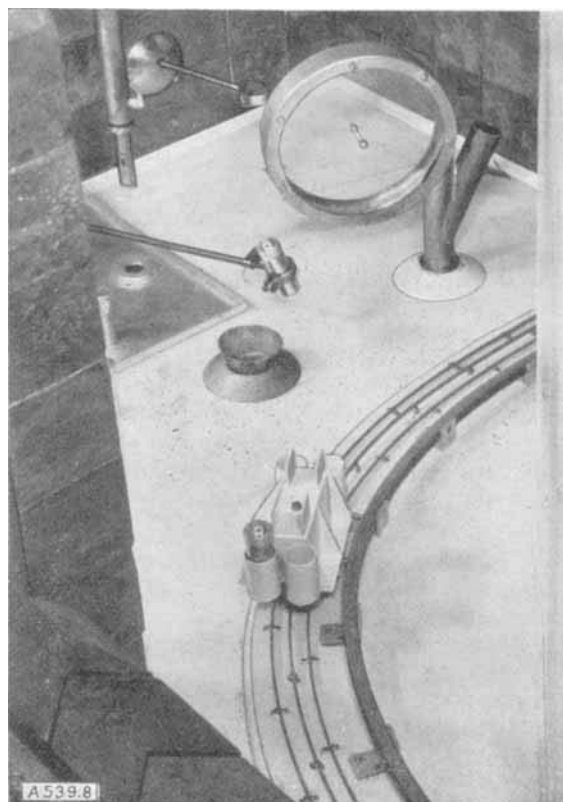


Bild 8

Abfüll- und Transportstation für hochradioaktives Material in Harwell. Geschützt durch eine Bleiwand können mit Manipulatoren aktive Radioisotope den Transportgefäßen der elektrischen Bahn entnommen werden. Die Behältercylinder können auch durch die oben rechts sichtbare „Rohrpost-Anlage“ befördert werden

so groß, daß man theoretisch nicht über eine spezifische Aktivität von 20–25 c/g CsCl hinausgehen kann.

Eine andere Methode der Aktivitätskonzentration ist der *Szilard-Chalmers-Prozeß*. Wird eine Verbindung bestrahlt, so ist der Rückstoß eines γ -Strahles im allgemeinen größer als die Bindungsenergie. Das aktive Atom wird daher aus der Verbindung herausgeschleudert und kann dann chemisch isoliert werden. Bei einer großen Anzahl von solchen Verbindungen tritt allerdings ziemlich rasch eine Wiedervereinigung ein. Für viele Isotope, deren spezifische Aktivität man gerne angereichert hätte, ist noch kein brauchbarer *Szilard-Chalmers-Prozeß* gefunden worden.

Einer der besten *Szilard-Chalmers-Prozesse* scheint beim Kaliumchromat vorzuliegen. Mit seiner Hilfe kann man hoch-aktives Chrom erhalten³⁾. Wir haben entsprechend Kaliumeisen(II)-cyanid zur Gewinnung von Eisen-Isotopen benutzt.

Oft sind auch physikalische Methoden verwendbar. So kann man elektromagnetische Anreicherungen vornehmen und dann das so angereicherte Material bestrahlen. So haben wir das ⁵¹Chrom und auch das Calcium aus ⁵⁰Chrom bzw. ⁴⁴Calcium erhalten, die vorher in einer elektromagnetischen Trennungsanlage angereichert worden waren. Im

³⁾ G. Harbottle u. A. G. Maddock, im Druck.

Falle des ⁵⁹Eisens haben wir erst ⁵⁸Eisen angereichert und dann als Cyanid einem *Szilard-Chalmers-Prozeß* unterzogen.

Die Pile wurde auch benutzt, um Neutronenquellen herzustellen. Sie beruhen auf demselben Prinzip wie die Ra-Be-Quellen, bei denen mit Hilfe von γ -Strahlung oder α -Teilchen ein Neutron emittiert wird. Als γ -Strahler kann man ¹²⁴Antimon nehmen, dessen γ -Energie gerade über dem Schwellwert der γ ,n-Reaktion liegt. Das Resultat ist, daß man verhältnismäßig langsame Neutronen erhält. Nachteilig sind allerdings erstens die γ -Strahlen, die man z. B. bei Benützung des Poloniums vermeiden kann, und zweitens die kurze Halbwertszeit des Antimons. Immerhin sind einige solcher Quellen im Gebrauch.

Kürzlich haben wir einen Aufbewahrungsblock für radioaktive Materialien fertiggestellt, der gleichzeitig auch jede gewünschte Handhabung von hochaktiven Stoffen ermöglicht (Bild 6–8). Der Block wird auch zur γ -Bestrahlung benutzt, da sehr starke γ -Strahlenquellen in ihm aufbewahrt werden. So wird z. B. die Veränderung von Kunstharzen durch β -Strahlung z. Zt. so untersucht⁴⁾.

Wir sind bestrebt, alles zu tun, um Radioisotope radioaktiv rein und mit den größtmöglich spezifischen Aktivitäten herzustellen.

Eingeg. am 17. November 1953 [A 539]

⁴⁾ Vgl. diese Ztschr. 65, 469 [1953].

Zur wirtschaftlichen Gewinnung von Atomenergie

Aus einem USA-Gutachten

Bearbeitet von Dr. A. WACKER und Dr. H. GRISEBACH

Chemisches Institut der Universität Tübingen

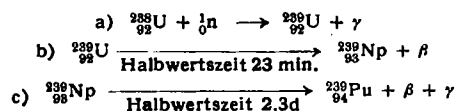
Die bei der Spaltung des Urans freiwerdende Wärme kann zur elektrischen Energieerzeugung oder zum Antrieb von Motoren ausgenützt werden. Die zu diesem Zweck vorgeschlagenen Reaktortypen werden besprochen.

P. Putmann von der Atomic Energy Commission (AEC) führte kürzlich aus, daß seiner Ansicht nach die in ökonomischer Weise zugänglichen fossilen Brennstoffe vielleicht in 60 bis 70 Jahren erschöpft sein werden, da der jährliche Energiebedarf der Welt ständig zunimmt¹⁾. — Bei der Spaltung von 1 kg Uran wird ungefähr die gleiche Energiemenge frei, wie bei der Verbrennung von 3000 t Kohle. Wenn man nun die Weltreserve an Energiequellen bestimmt und dabei nach P. Putmann die Q-Einheit (1 Q = 10¹⁸ Kilowattstunden) benutzt, so soll sich die Reserve an fossilen Brennstoffen auf 27 Q, an Kernenergie (Uran, Thorium) auf 575 Q belaufen. Es ergibt sich die Forderung, die gegenwärtigen Energiequellen zu ergänzen und es taucht die Frage auf, kann man die Kernenergie nutzbar machen?

Wohl kaum eine naturwissenschaftliche Arbeitsrichtung hat sich so stürmisch entwickelt wie die Erforschung der Kernspaltung. Im Dezember 1938 entdeckte O. Hahn zusammen mit F. Strassmann die Spaltung des Urans mit Neutronen. Vier Jahre später, am 2. Dezember 1942, wurde in Chicago unter der Leitung von E. Fermi, die erste stationäre Kernkettenreaktion in Gang gesetzt. Im Dezember 1951 war es möglich die bei der Kernspaltung freiwerdende Energie nutzbar zu machen. Und im Mai 1953 gelang es mit dem Brutprozeß auch das häufige Isotop ²³⁸U der Spaltung in einer Kettenreaktion zugänglich zu machen.

¹⁾ Chem. Engng. News 31, 3990 [1953].

Zunächst soll kurz auf die im Reaktor ablaufenden Reaktionen eingegangen werden. Das natürliche Uran, das als Brennstoff dient, besteht aus den Isotopen ²³⁴U, ²³⁵U und ²³⁸U mit einer Häufigkeit von 0,006, 0,7 und 99,3 %. Im Reaktor laufen nebeneinander zwei Prozesse ab. Beim ersten wird durch ein Neutron ein Atom ²³⁵U in zwei Spaltstücke zerlegt, wobei im Durchschnitt 2,5 Neutronen entstehen. Die Neutronen können nun entweder in einem zweiten Prozeß nach der Reaktion



von ²³⁵U eingefangen werden, das dabei in Plutonium übergeht, oder durch erneute Spaltung von ²³⁵U die Kernkettenreaktion in Gang halten. ²³⁵U kann nur durch schnelle Neutronen gespalten werden, d. h. solche von der Größenordnung MeV. Durch langsame Neutronen kann es nicht gespalten werden. Es fängt jedoch Neutronen von rd. 7 eV ein (a). ²³⁵U kann dagegen auch durch langsame (thermische) Neutronen gespalten werden. Die bei der Spaltung entstehenden Neutronen hoher Geschwindigkeit kann man durch geeignete Bremsstoffe (Moderatoren) z. B. Graphit oder D₂O, auf thermische Geschwindigkeit (daher auch die Bezeichnung „thermischer“ Reaktor) abbremmen. Eine stationäre Kernkettenreaktion kann nur dann zustande kommen, wenn der Multiplikationsfaktor k etwas größer als 1 ist. k ist das Verhältnis der neu gebildeten Neutronen zu der Zahl der zu dem Prozeß verbrauchten Neutronen.

Das Uran ist bei der Benutzung von Graphit als Moderator etwa in Form eines kubischen Gitters in das Graphit eingebettet. Der erste selbstlaufende Reaktor enthielt etwa 6 t Uranmetall neben Uranoxyd. Während der Reaktion vermindert sich das ²³⁵U und die Konzentration an Plutonium wächst. Da das Plutonium selbst durch thermische Neutronen spaltbar ist, besteht die Tendenz, die Abnahme von ²³⁵U soweit auszugleichen, daß die