

51

Int. Cl. 2:

G 21 C 15/18

19 **BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND**

DEUTSCHES  **PATENTAMT**

11

Auslegeschrift 25 16 123

21

Aktenzeichen: P 25 16 123.3-33

22

Anmeldetag: 12. 4. 75

43

Offenlegungstag: 21. 10. 76

44

Bekanntmachungstag: 26. 10. 78

30

Unionspriorität:

32 33 31

—

54

Bezeichnung: Verfahren zum Abführen der Zerfallswärme radioaktiver Spaltprodukte

71

Anmelder: Hochtemperatur-Kernkraftwerk GmbH (HKG) Gemeinsames Europäisches Unternehmen, 4701 Uentrop

72

Erfinder: Schweiger, Fritz, Dipl.-Ing., 5800 Hagen

56

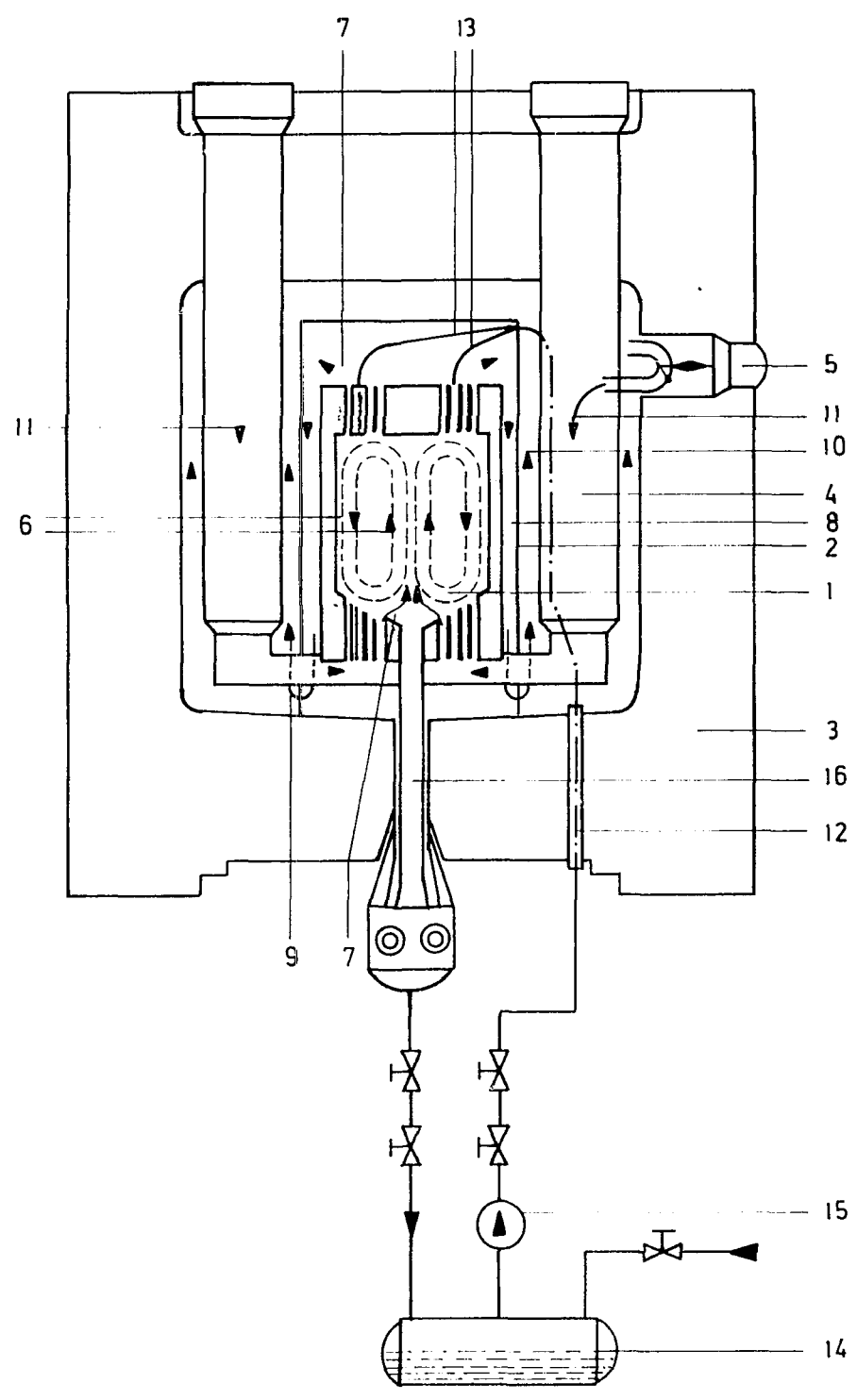
Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht gezogene Druckschriften:

DE-OS 21 06 976

Atomwirtschaft, November 1971, S. 610-612

Atomwirtschaft, Februar 1972, S. 110-112

DE 25 16 123 B 2



Patentansprüche:

1. Verfahren zum Abführen der Zerfallswärme radioaktiver Spaltprodukte bei Kernreaktoren in besonderen Störfällen, bei dem nach Eintritt der den Störfall bedingenden Fehlerkombination Wasser, vorzugsweise vollentsalztes Wasser, in das Reaktorcore eingebracht wird, dadurch gekennzeichnet, daß es bei heliumgekühlten, graphit-

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß das Wasser von oben auf das Core gegossen wird.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß das Wasser in Abhängigkeit der für die Einbauten höchstzulässigen Temperaturgradienten bis zur Stabilisierung der Wärmebilanz dosiert auf die Coreoberfläche gegeben wird.

4. Verfahren nach einem oder mehreren der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, daß das Wasser erst auf die Coreoberfläche gegeben wird, nachdem der Neutronenfluß durch Einfahren von Absorberstäben abgeschaltet ist.

5. Verfahren nach einem oder mehreren der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, daß dem Wasser vor dem Einbringen Absorbermaterial, vorzugsweise in Form von Borverbindungen, beigegeben wird.

6. Verfahren nach einem oder mehreren der Ansprüche 1 bis 4 dadurch gekennzeichnet, daß die kinetische Energie der Wassertropfen zum Zeitpunkt ihres Auftreffens auf die Oberfläche des Cores höchstens der sich aus dem freien Fall ergebenden Energie entspricht.

7. Verfahren nach einem oder mehreren der Ansprüche 1 bis 6, dadurch gekennzeichnet, daß das nach seinem Einbringen in das Core wieder kondensierte Wasser über ein Kugelabzugsrohr und über für den Fall des Bruches eines Dampferzeugers vorgesehene Entwässerungsröhre nach unten abgezogen und je nach Bedarf über oberhalb des Cores mündende, verteilt angeordnete Förderrohre dem Core erneut zugeführt wird.

8. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß im Falle eines großen Lecks in der Kernreaktoranlage die Kühlgasgebläse umgehend abgeschaltet werden.

9. Verfahren nach einem oder mehreren der Ansprüche 1 bis 7, dadurch gekennzeichnet, daß bei verbliebenem vollen Kühlgasdruck, jedoch Ausfall sämtlicher Dampferzeuger der durch die Dampfbildung des eingebrachten Wassers erzeugte Überdruck vorzugsweise über ein Sicherheitsventil aus dem Reaktordruckbehälter abgeblasen und der Druck gegebenenfalls unter den Betriebswert abgesenkt wird.

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Abführen der Zerfallswärme radioaktiver Spaltprodukte bei Kernreaktoren in besonderen Störfällen, bei dem nach Eintritt der den Störfall bedingenden Fehlerkombination Wasser, vorzugsweise vollentsalztes Wasser, in das Reaktorcore eingebracht wird.

Während des Betriebes von Kernreaktoren entstehen radioaktive Spaltprodukte, die aufgrund ihres radioaktiven Zerfalls die sogenannte Zerfallswärme erzeugen. Solange ein Reaktor im Betrieb ist, ist hinsichtlich seines Verhaltens nicht erforderlich oder zumindest nur von untergeordneter Bedeutung, zwischen der auf Kernspaltungen beruhenden Wärmeerzeugung und dem vom radioaktiven Zerfall der Spaltprodukte herrührenden Wärmebeitrag zu unterscheiden.

Der Anteil der Zerfallswärme an der Reaktorleistung ist jedoch dann gesondert zu betrachten, wenn für den Reaktor eine Abschaltsituation eintritt. Nach dem Abschalten eines Reaktors, d. h., wenn die von Kernspaltungen herrührende Leistung entsprechend dem mit den verzögerten Neutronen abklingenden Neutronenfluß zu Null geworden ist, ist nämlich nur noch der sich aus der Zerfallswärme ergebende Leistungsanteil vorhanden. Dieser Anteil ist zwar klein — er beträgt bei den hier zur Diskussion stehenden Reaktortypen unmittelbar nach dem Abschalten ca. 6% der zuvor erzeugten Leistung, sinkt dann innerhalb von 5 Minuten auf ungefähr die Hälfte und erreicht nach insgesamt 30 Minuten weniger als $\frac{1}{3}$ des Anfangswertes — jedoch stellt er für die zu ergreifenden Sicherheitsmaßnahmen eine mit erheblichen Aufwendungen verbundene problematische Größe dar.

Wenn es praktisch möglich wäre, alle Reaktoren so auszuliegen, daß nach dem Abschalten die Wärmeverluste durch den Reaktorbehälter so groß wären, daß die Zerfallswärme ohne Hilfsmaßnahmen abfließen könnte, ohne unzulässige Temperaturen am Reaktorbehälter oder an den Einbauten im Reaktorbehälter hervorzurufen, würde die Zerfallswärme kein Problem darstellen. Eine derartige Auslegung der Reaktoren ist jedoch in der Praxis unmöglich. Bei gasgekühlten Hochtemperatur-Kernreaktoren ließe sich diese Bedingung nämlich nur dann erfüllen, wenn die mittlere Leistungsdichte im Reaktor so klein gewählt würde, daß ein wirtschaftlicher Betrieb nicht mehr möglich wäre.

Es muß in diesem Zusammenhang allerdings darauf hingewiesen werden, daß in der Veröffentlichung Jul-1112-RG Oktober 74 am Beispiel des sogenannten PR-500 Prozeßwärmereaktors mit Kugelbrennelementen dargelegt wurde, daß bei einer mittleren Leistungsdichte 5 MW/m^3 im Reaktorkern die Zerfallswärme ohne Zwangsumlaufkühlung an die dort vorgesehenen drei Dampferzeuger abfließen kann, ohne daß im Reaktorbehälter Temperaturen auftreten, die zu einer Überbeanspruchung führen würden. Dies ist insbesondere deshalb ein überraschendes Ergebnis und nicht zu verallgemeinern, weil es sich dort um eine sogenannte OTTO-Beschickung (one through than out) handelt und demzufolge das Core in der Nähe der Oberfläche eine maximale örtliche Leistungsdichte von 17 MW/m^3 und in der Nähe des Core-Bodens nur noch $0,5 \text{ MW/m}^3$ aufweist, also eine stark unterschiedliche Leistungsverteilung besitzt. Es muß jedoch nachdrücklich hervorgehoben werden, daß es für die in diesem Fall erwartete selbsttätige Abfuhr der Zerfallswärme unbedingte Voraussetzung ist, daß der volle statische Kühlgasdruck im Reaktor vorhanden ist und die drei Dampferzeuger mit Wasser gespeist werden, so daß sich eine Naturkonvektion ausbilden kann. Es ist zwar zuzugeben, daß ein derartiges Verhalten des in der genannten Veröffentlichung angesprochenen Reaktortyps dessen Sicherheit wesentlich erhöht, jedoch müssen gleichwohl Maßnahmen für den Fall vorgesehen sein, daß — durch welche Fehler oder äußeren Einflüsse auch immer

hervorgerufen — der Kühlgasdruck sinkt, beispielsweise durch Entweichen des Kühlgases, und/oder die Versorgung der Kühlgasumwälzgebläse ausfällt und/oder die Bespeisung der Dampferzeuger mit Wasser nicht mehr möglich ist.

Die Wahrscheinlichkeit des Eintritts einer derartigen Störfallkombination ist zwar sicherlich gering, muß jedoch, wie ohne weiteres einzusehen ist, bei der Auslegung von Kernreaktoren im Rahmen der Sicherheitseinrichtungen unbedingt Berücksichtigung finden. Nicht zuletzt auch aus Gründen der symmetrischen Temperatur- und Leistungsbelastung von Reaktoren, der Unterbringung der verschiedenen Reaktorkomponenten, z. B. der Gebläse und Dampferzeuger im Reaktordruckgefäß, und auch aus Gründen der Verfügbarkeit der Stromerzeugung werden in aller Regel mehr als ein oder zwei Dampferzeuger- und Gebläseeinheiten vorgesehen, z. B. drei Einheiten beim erwähnten PR-500 und je sechs Einheiten beim sogenannten HTR-1.160 und THTR-300. Die Wahrscheinlichkeit, daß bei einem gasgekühlten Reaktor ein Kühlgasverlust mit einem Druckabfall auf 1 ata eintritt, wird zwar als gering angesehen, darf aber nicht vernachlässigt werden. Ein derartiger Störfall kann auch noch als ungefährlich bezeichnet werden, solange noch ausreichend Kühlkapazität auf der Gebläse- und Dampferzeugerseite zur Verfügung steht. Die Wahrscheinlichkeit, daß bei einem Kühlgasverlust mit einem Druckabfall auf 1 ata auch gleichzeitig alle Gebläse- und Dampferzeugereinheiten für die Abfuhr der Zerfallswärme ausfallen, ist also als noch geringer anzusehen als der als Einzelstörung angenommene Kühlgasverlust.

Aber auch diese geringe Wahrscheinlichkeit des Zusammentreffens mehrerer schwerer Störungen muß nicht zuletzt im Interesse der Öffentlichkeit bei der Konzeption Berücksichtigung finden, was dadurch geschieht, daß heute zusätzlich zu den aus den bereits diskutierten betrieblichen Gründen vorhandenen Redundanzen noch weitere aufwendige redundante Hilfsanlagen, z. B. mehrere Notstromaggregate, mehrere zumindest teilweise verbunkerte Notsteuerstellen, Meß- und Schutzeinrichtungen, Reserve-Kühlwasserversorgungen u. dgl. gefordert und vorgesehen werden.

Es ist zwar zutreffend, daß durch die genannten und andere zusätzliche Maßnahmen und Anlagen die Wahrscheinlichkeit, daß die Zerfallswärme nach Eintreten eines Störfallereignisses nicht in ausreichendem Maße abgeführt werden kann, theoretisch beliebig klein gehalten werden kann. Damit ist jedoch ein Aufwand in allen erdenklichen Richtungen, wie Zeit, Personal, Wartung, Ersatzteilhaltung usw. verbunden, der derart hoch ist, daß ein vitales Interesse daran besteht, dieses Problem durch ökonomische, absolut sichere und selbst nicht störanfällige Maßnahmen zu lösen.

Aus der DE-OS 21 06 976 ist bereits ein Schutzkühlverfahren, insbesondere Notkühlverfahren, eines gasgekühlten Hochtemperatur- und/oder Hochdruckreaktors bekannt, wobei ausschließlich heliumgekühlte, schnelle Brüder angesprochen sind. Wasser und Wasserdampf wird dabei als Kühlmittel für bereits vorgeschlagene Notkühlsysteme eingesetzt und die Notkühlung erfolgt immer bei eingefahrenen Regelstäben, d. h. abgeschaltetem Reaktor. Das Notkühlmittel ist gemäß dem bekannten Vorschlag immer in Reserve gehalten und wird mittels eines Systems von Pumpen und Leitungen aus den Reservebehältern in den Reaktorkern und in die Wärmetauscher gebracht. Aber selbst bei diesen Reaktortypen wird die Notkühlung mit Wasser bzw.

Wasserdampf als ungeeignet angesehen, da nämlich diese Notkühlmittel nur unter hohem Druck in den Reaktorkern einführbar sind, was aber bei z. B. großen Lecks oder bei Verwendung von Wasser und hohen Temperaturen auf große Schwierigkeiten stößt.

Aber auch für die im Rahmen der Erfindung in Betracht kommenden Reaktortypen wurde ein Wassereinbruch bisher immer als ausgesprochen unangenehm angesehen. Bei den in den USA von der Firma Gulf entwickelten heliumgekühlten, graphitmoderierten Hochtemperaturreaktoren sind zur Abfuhr der Zerfallswärme aus dem Reaktorkern drei unabhängige Nachwärmeabfuhrsysteme vorgesehen, obwohl sechs parallelgeschaltete Dampferzeuger, also eine ausreichende Redundanz, vorhanden ist. Auch beim THTR-300 erfolgt die Notnachwärmeabfuhr über die sechs Betriebsdampferzeuger, die in Notfällen als redundante Notkühlmöglichkeit geschaltet werden. Es bedingt enormen zusätzlichen finanziellen Aufwand, diese redundante Nachwärmeabfuhr in allen denkbaren Fällen zu gewährleisten.

Auch aus »Atomwirtschaft«, November 1971, Seite 610 ff. geht der erhebliche Aufwand hervor, der bisher im Zusammenhang mit der Kernnotkühlung bzw. Notnachkühlung für erforderlich gehalten wurde.

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, ein Verfahren zum Abführen der Zerfallswärme, einschließlich der im Core gespeicherten Wärme, für heliumgekühlte graphitmoderierte Hochtemperatur-Kernreaktoren vorzuschlagen, das nicht nur für den höchst unwahrscheinlichen Fall des Ausfalls sämtlicher Notaggregate, also beim Eintritt der schwerwiegendsten und unwahrscheinlichsten Fehlerkombination absolut sicher ist, sondern auch den bisher diesbezüglich als unbedingt erforderlich gehaltenen Aufwand reduziert. Die Lösung dieser Aufgabe besteht erfindungsgemäß in der Anwendung des eingangs angegebenen Verfahrens bei heliumgekühlten, graphitmoderierten Hochtemperatur-Kernreaktoren.

In Anbetracht der Tatsache, daß bei den in Frage stehenden Reaktortypen im Kühlgaskreis Feuchtigkeit auf alle Fälle vermieden wird, die Feuchtigkeitsgehalte sogar kleiner als 0,5 vppm gehalten werden, ist diese Maßnahme, in einen Hochtemperatur-Kernreaktor mit Brennelementen aus Graphit und Helium als Kühlmittel — einer Kombination, die auch bei sehr hohen Temperaturen zu keinerlei Korrosion führen kann — Wasser einzubringen, eine überraschend einfache Lösung. Es sei an dieser Stelle allerdings betont, daß das erfindungsgemäße Verfahren ausschließlich eine Katastrophenmaßnahme zur Notkühlung darstellt und nicht als Betriebsmaßnahme angesehen werden kann, da nach dem Wassereinspritzen der Reaktor vorerst nicht mehr gefahren werden kann. Dies bedeutet jedoch in den Anwendungsfällen des Verfahrens keinen Nachteil, da im Falle des Notwendigwerdens der erfindungsgemäßen Maßnahmen andere Einrichtungen am Reaktor voraussetzungsgemäß derart zerstört sind, daß das Entfernen des eingespritzten Wassers aus dem Core nicht länger dauert als die übrigen notwendigen Reparaturen, sofern der Reaktor nach einem derart starken Störfall überhaupt noch repariert werden soll.

Der erhebliche Vorteil des Verfahrens liegt in seiner absoluten Sicherheit der Beherrschung auch der denkbar ungünstigsten Störfallkombinationen, insbesondere auch darin, daß nunmehr auf aufwendige zusätzliche Sicherheitsmaßnahmen, wie getrennte Nachwärmeabfuhrreinrichtungen, verzichtet werden

kann.

Zwar ist es grundsätzlich gleichgültig, an welcher Stelle das Wasser in das Core gebracht wird, jedoch ist es nicht zuletzt wegen des sich im Core aufgrund der Naturkonvektion einstellenden Temperaturgradienten vorteilhaft, das Wasser von oben auf das Core zu gießen.

Vorzugsweise wird das Wasser in Abhängigkeit der für die Einbauten höchstzulässigen Temperaturgradienten bis zur Stabilisierung der Wärmebilanz, d. h. bis zum Gleichgewicht zwischen Zerfallswärme und abgeführter Wärme — z. B. durch auch sonst vorhandene Wärmeverluste oder noch verbleibende Abfuhreinrichtungen — dosiert auf die Coreoberfläche gegeben. Das bedeutet mit anderen Worten, daß die Zugabe des Wassers zweckmäßigerweise kontinuierlich erfolgt, und zwar während der Zeit, die das Maß für das Integral zur Ermittlung der abzuführenden Energie darstellt. Diese Maßnahme sei an einem Beispiel näher erläutert:

Die Wassermenge, die beispielsweise beim THTR-300 mit einer thermischen Nennleistung von 750 MW für die erfindungsgemäße Notkühlung benötigt wird, läßt sich folgendermaßen bestimmen. 10 Stunden nach dem Abschalten beträgt das Integral der Zerfallswärme etwa 88 MWh nach einem vorangegangenen Vollastbetrieb von einem Jahr. Hiervon sind etwa 20 MWh für den Wärmeabfluß an die Kühlung des Reaktordruckbehälters abzuziehen, so daß noch etwa 68 MWh abzuführen sind. Wenn weiterhin gefordert wird, daß die mittlere Core-Temperatur, die im Vollastbetrieb 620°C beträgt, auf 500°C abgesenkt werden soll, sind aus der Speicherkapazität des Cores weiteres 8 MWh als im Core gespeicherte Wärme, also insgesamt 76 MWh abzuführen. Für die Bereitstellung von ausreichenden Mengen an vollentsalztem Wasser ist im ungünstigsten Fall anzunehmen, daß die gesamte Wärme allein durch die Verdampfung des eingebrachten Wassers abgeführt werden muß. Es sind deshalb maximal 110 t von 50°C bereitzustellen, was für ein übliches Kraftwerk kein Problem bedeutet. Die Zugabe erfolgt nun kontinuierlich während der im Integral der Zerfallswärme zugrundegelegten 10 Stunden entsprechend dem Temperaturverlauf an den Einbauten. Das Volumen der erforderlichen Wassermengen ist im übrigen klein gegenüber dem geometrisch freien Corevolumen, das im Falle des THTR-300 ungefähr 2500 m³ beträgt.

Das erfindungsgemäße Verfahren läßt nicht zuletzt aufgrund seiner Einfachheit in kürzester Zeit eine Anpassung der zu ergreifenden Maßnahmen auf den jeweils eingetretenen Störfall zu. So erlaubt zunächst die Speicherkapazität des Cores erforderlichenfalls den Ausfall der Umwälzung des Primärkühlkreises, so daß genügend Zeit verbleibt, um die notwendigen Maßnahmen zu entscheiden und einzuleiten, ohne daß zunächst nach dem Abschaltvorgang eine schädliche Temperaturbeanspruchung für das Core und die sonstigen Reaktoreinbauten eintritt. Bezüglich der Speicherfähigkeit ergibt sich für den THTR-300 im ungünstigsten Fall, d. h. nach vorangegangenem unendlich langem Vollastbetrieb für das Integral der Nachwärme über eine Stunde etwa 15 MWh, wodurch ein Ansteigen der mittleren Temperatur um etwa 230°C eintreten würde. Dabei ist aus Gründen der Vereinfachung die nicht zutreffende ungünstigste Annahme gemacht worden, daß während der ganzen Stunde die Wärme innerhalb des Kugelhaufens bleibt und kein Abfluß der Wärme in den Reflektor, in die sonstigen Reaktoreinbauten und den Kühlkreislauf des Reaktordruckbehälters erfolgt.

Zusammen mit der mittleren Temperatur im Core zum Zeitpunkt des Abschaltens in Höhe von ca. 620°C wird die Temperatur eine Stunde nach Abschalten, ohne Wärmeabfuhr mit den Gebläsen in dieser Zeit, auf jeden Fall kleiner als 850°C und damit noch zulässig sein.

Sofern es nach Eintritt des Störfalls möglich ist, wird das Wasser erst dann auf die heiße Coreoberfläche gegeben, nachdem der Neutronenfluß durch Einfahren von Absorberstäben abgeschaltet ist, also nach Beendigung eines normalen Abschaltvorgangs. Sind jedoch die Beschädigungen durch äußere Einflüsse so groß, daß der Reaktor für immer stillgesetzt werden soll oder muß, dann bietet das erfindungsgemäße Einbringen von Wasser zur Notkühlung eines heliumgekühlten, graphitmoderierten Hochtemperaturreaktors die hervorragende zusätzliche Möglichkeit, dem Wasser vor seinem Einbringen in das Core Absorbermaterial, vorzugsweise in Form von Borverbindungen, beizumengen, welches den Reaktor bleibend abschaltet.

Der erfindungsgemäße Vorschlag des Einbringens von Wasser führt im übrigen überraschenderweise zu keinem auch während des normalen Betriebs unter allen Umständen zu vermeidenden Temperaturschock. Die wird darauf zurückgeführt, daß einerseits das Core aus einer Schüttung von Kugelementen besteht und selbst kleinere Wassermengen nicht anstauen kann und andererseits sich beim Zusammentreffen von Wasser und heißem Graphit sofort der sogenannte Leidenfrost Effekt einstellt. Unter Edelgas auf etwa 1000°C aufgeheizte Kugelemente, die mit dieser Temperatur in kaltes Wasser getaucht werden, glühen aufgrund einer sich zwischen dem Graphit und dem Wasser ausbildenden wärmeisolierenden Dampfschicht überraschend lange weiter. Um eine derartige Isolierschicht die sich auch zwischen den einzelnen Wassertropfen und der heißen Oberfläche der Brennelemente ausbildet, nicht zu zerstören, wird das Wasser im Rahmen der Erfindung vorzugsweise so aufgegeben, daß die kinetische Energie der Wassertropfen zum Zeitpunkt ihres Auftreffens auf die Oberfläche des Cores höchstens ihrer Schwerkraft entspricht. Dies kann in einfacher Weise dadurch erreicht werden, daß gegebenenfalls überschüssige Förderenergie des Wassers mittels bekannter Prallbleche oder durch geeignete Rohrführung vernichtet wird.

Bei mit kontinuierlicher Beschickung arbeitender Kernreaktoren eröffnet sich eine besonders einfache Möglichkeit für das Einrichten der erfindungsgemäßen Notkühlung dadurch, daß das Wasser über am Umfang des Reaktors ohnehin angeordnete Brennelementförderrohre dem Core von oben zugegeben wird. Kondensiertes Wasser kann dann über ein ebenfalls bereits vorhandenes Kugelabzugsrohr zu ohnehin vorhandenen Entwässerungsrohren geführt, nach unten abgezogen und je nach Bedarf mit einer Pumpe über die erwähnten Brennelementförderrohre erneut dem Core zugeführt werden.

Die genannten Anwendungsfälle zeigen, daß das erfindungsgemäße Verfahren jeder Kombination schwerster Störfälle gewachsen ist. Dies gilt insbesondere auch für die in letzter Zeit häufig diskutierte Möglichkeit eines beispielsweise durch einen Flugzeugabsturz in einen Reaktor geschlagenen großen Lecks. In diesem Fall müßten die Gebläse umgehend, jedoch spätestens mit dem Einbringen des Wassers, abgeschaltet werden, da andernfalls Luft von außen einströmen und der Kugelhaufen zu brennen anfangen würde; der austretende Wasserdampf verhindert jedoch einen

Luft Eintritt.

Zur Verdeutlichung der vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten des erfindungsgemäßen Verfahrens sei für den THTR-300 der Störfall angenommen, daß statt der ausgeführten Doppeldeckelabschlüsse für die Dampferzeuger nur einfache Abschlüsse vorgesehen würden und ein solcher zerstört würde und das gesamte Kühlgas bis auf 1 ata ausgeströmt ist und außerdem kein Dampferzeuger für die Nachwärmeabfuhr zur Verfügung steht. In diesem Fall ist sofort mit der Wassereinbringung zu beginnen, wobei vorausgesetzt werden kann, daß das verdampfte Wasser vorzugsweise durch die große Öffnung, deren Deckel zerstört ist, ausströmt und nur wenig Wasser im Core kondensiert, nachdem es durch die Innenisolierung des Reaktor-druckbehälters diffundiert ist. Alle anderen Reaktoreinbauten liegen mindestens auf 260°C, d. h. der Kaltgas-temperatur im normalen Betrieb.

Weiterhin soll unterstellt werden, daß der Kühlgasdruck noch den Betriebswert besitzt, das Primärsystem also dicht ist, aber kein Dampferzeuger für die Abfuhr der Nachwärme zur Verfügung steht. Auch bei diesem Störfall kann Wasser auf die Coreoberfläche gegeben werden, jedoch sollte ein Sicherheitsventil vorgesehen sein, über welches nicht nur bei Überdruck abgeblasen wird, sondern der Druck gegebenenfalls auch unter den betrieblichen Wert abgesenkt wird, um dem Reaktorbehälter Wärme zu entziehen, falls die Temperaturmessungen an den Stahleinbauten zeigen, daß die Wärmebelastung infolge Aufheizung durch überhitzten Dampf zu groß werden könnte. Die zusätzliche Maßnahme des Absenkens des Drucks unter den Betriebswert kann bei neuen Projekten dadurch vermieden werden, daß die metallischen Einbauten so ausgelegt werden, daß die Aufheizung durch überhitzten Dampf im zulässigen Bereich bleibt.

Wie bereits erwähnt, müssen die mit dem erfindungsgemäßen Verfahren für den Notfall vorgeschlagenen Maßnahmen keineswegs zur endgültigen Stilllegung des Reaktors führen; vielmehr ist je nach Störfallkombination ein späterer Weiterbetrieb und die Wiederverwendung zumindest von Teilen der Einrichtungen ohne weiteres möglich. Letzteres gilt insbesondere auch für die kugelförmigen Brennelemente. Denn selbst unter der ungünstigsten Annahme, daß die von einem Brennelement abzuführende Wärmemenge nach dem Einbringen des Wassers allein durch die sogenannte Wassergasreaktion — weitere Sekundärreaktionen können insbesondere deshalb vernachlässigt werden, weil der Primärkreis ab Beginn der Wassereinbringung nicht mehr umgewälzt werden wird — verbraucht werden soll, würde der Graphitabbrand des Elementes nur 7% des Gewichtes ausmachen. Die sich daraus ergebende Durchmesserreduzierung gestattet ohne weiteres eine spätere Wiederverwendung der Elemente. Die übrigen Graphiteinbauten erleiden keine meßbare Korrosion.

Da die Wassergasreaktion nur an ca. 20% aller Kugelbrennelemente ablaufen wird, am weitaus größten Teil, nämlich 80% der Kugelelemente das Wasser jedoch nur verdampfen wird, ergibt sich mit dem Einbringen des Wassers auch insofern eine inhärent sichere Maßnahme, als sich stets eine relativ große Menge Dampf im Reaktorbehälter befinden wird, so daß die Mischung der Atmosphäre im Reaktor aus Resten von Helium, Wasserdampf H₂ sowie CO selbst nach eventuellem Lufteinbruch nicht zündfähig sein kann.

In der Zeichnung ist der Aufbau des erwähnten Thorium-Hochtemperatur-Reaktor (THTR-300) schematisch dargestellt, und zwar mit den für die Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens beispielsweise erforderlichen Zusatzeinrichtungen.

Das Reaktorcore 1 besteht aus einer Schüttung kugelförmiger Brennelemente, die sich in einem zylindrischen Gefäß befinden. Dieses Gefäß wird von einem aus Graphitblöcken aufgebauten Mantel gebildet, der gleichzeitig als Neutronenreflektor dient und allseitig das Reaktorcore umgibt. Die gesamte Graphit- und Kohlesteineinbauten sind auf einer Stahlplatte aufgebaut, die zusammen mit einer den Graphitmantel umschließenden Stahlwand und einer Deckenplatte den sogenannten thermischen Schild 2 als Abschirmung gegen Gamma-Strahlung aus dem Reaktor bilden.

Das Reaktorcore sowie die übrigen für den Primärkreislauf wesentlichen Einrichtungen werden von einem Druckbehälter 3 umgeben, der im vorliegenden Ausführungsbeispiel als Spannbetonbehälter ausgeführt ist. In diesem befinden sich als wesentliche Bestandteile des Primärkreislaufes die Dampferzeuger 4 sowie die Kühlgasgebläse 5.

Der in der Zeichnung durch Pfeile dargestellte Kühlgasumlauf gilt richtungsgemäß für den Fall, daß die Gebläse 5 abgestellt sind, d. h. ein sich durch Konvektion bedingter Naturumlauf einstellt. Dabei kann man einen inneren und äußeren Naturumlauf unterscheiden. Der innere Naturumlauf, der sich im Reaktorcore aufgrund des dort herrschenden Temperaturgradienten einstellt, wird durch die Pfeile 6 verdeutlicht. Diesem überlagert sich der äußere Naturumlauf, bei dem in gegenüber dem Betriebszustand, bei dem die Kühlgasgebläse eingeschaltet sind, umgekehrter Richtung das Gas die Graphiteinbauten und das Core entsprechend den Pfeilen 7 von unten nach oben durchströmt. In dem zwischen dem thermischen Schild und dem Graphitreflektor gebildeten zylindrischen Ringspalt 8 strömt das Gas dann nach unten, wird gemäß dem Pfeil 9 umgelenkt, steigt in Ringspalt 10 zwischen Spannbetonbehälter 3 und thermischem Schild 2 nach oben und gelangt dann über die Gebläse 5 entsprechend den Pfeilen 11 in die Dampferzeuger, von wo es von unten her bei 7 wieder in das Core eintritt.

Wie bereits erwähnt, bietet die Speicherkapazität des Cores im Zusammenhang mit den geschilderten Konvektionsumläufen die Möglichkeit, bei bestimmten Störfallkombinationen eine gewisse Zeitspanne vom Eintritt des Notfalls an zu überbrücken, um die erforderlichen Maßnahmen vorzubereiten und einzuleiten. Unter anderem muß entschieden werden, in welcher Dosierung das Wasser zugegeben wird. Die Zuführungseinrichtungen sollten möglichst einfach gestaltet sein, um jegliche Störanfälligkeit auszuschalten. Bei einem mit Kugelumlauf arbeitenden Reaktor, beispielsweise dem THTR-300, können bereits vorhandene Einrichtungen nutzbar gemacht werden. So eignen sich beispielsweise am Umfang verteilt angeordnete Brennelementeförderrohre 12 ohne weiteres als Wassereinspritzrohre, da sie an der für die Wassereinspritzung bevorzugt vorgesehenen Aufgabeseite, nämlich oberhalb des Cores als Leitungen 13 münden. Das benötigte vollentsalztes Wasser kann von einem nicht dargestellten Vorratsbehälter in einen Zwischenbehälter 14 gegeben werden, von dem aus es mit Hilfe einer Pumpe 15 über die Förderrohre 12 in die Leitungen 13 gepumpt wird. Im Core kondensiertes Wasser kann über eine ohnehin vorhandenes Kugelabzugsrohr 16 zurück in den

25 16 123

9

10

Zwischenbehälter 14 gelangen und von dort erneut dem Core zugeführt werden.

Die Beschreibung einer beispielhaften Ausführung der für die Durchführung der vorzusehenden Einbauten zeigt, daß dieses für den Notfall absolut sichere

Verfahren mit geringstem Aufwand durch kostenmäßig gegenüber bisher vorgeschlagenen Sicherheitseinrichtungen wesentlich günstigere Vorrichtungen zur Anwendung kommen kann.

Hierzu 1 Blatt Zeichnungen
