



(19)
Bundesrepublik Deutschland
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 603 05 182 T2 2007.03.08**

(12) **Übersetzung der europäischen Patentschrift**

(97) **EP 1 521 271 B1**

(51) Int Cl.⁸: **G21C 3/326** (2006.01)

(21) Deutsches Aktenzeichen: **603 05 182.0**

(96) Europäisches Aktenzeichen: **03 292 424.3**

(96) Europäischer Anmeldetag: **01.10.2003**

(97) Erstveröffentlichung durch das EPA: **06.04.2005**

(97) Veröffentlichungstag

der Patenterteilung beim EPA: **10.05.2006**

(47) Veröffentlichungstag im Patentblatt: **08.03.2007**

(73) Patentinhaber:

Framatome ANP, Courbevoie, FR

(84) Benannte Vertragsstaaten:

AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IT, LI, LU, MC, NL, PT, RO, SE, SI, SK, TR

(74) Vertreter:

Grünecker, Kinkeldey, Stockmair & Schwanhäusser, 80538 München

(72) Erfinder:

Belvegue, Patrice, 38440 SAINTE ANNE SUR GERVONDE, FR; Zheng, Songhui, 69003 LYON, FR

(54) Bezeichnung: **Brennstabündel für einen Druckwasserkernreaktor mit Brennstäben mit zwei Gadoliniumgehalten**

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach der Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents kann jedermann beim Europäischen Patentamt gegen das erteilte europäische Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch ist schriftlich einzureichen und zu begründen. Er gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist (Art. 99 (1) Europäisches Patentübereinkommen).

Die Übersetzung ist gemäß Artikel II § 3 Abs. 1 IntPatÜG 1991 vom Patentinhaber eingereicht worden. Sie wurde vom Deutschen Patent- und Markenamt inhaltlich nicht geprüft.

Beschreibung

[0001] Die vorliegende Erfindung betrifft ein Brennelementbündel (eine Brennstoffkassette) für einen Druckwasserreaktor, das (die) erste Kernbrennelemente (Brennstäbe) mit einem ersten Massengehalt an Gadolinium und zweite Kernbrennelemente (Brennstäbe) mit einem zweiten Massengehalt an Gadolinium umfasst, wobei der zweite Massengehalt höher ist als der erste Massengehalt.

[0002] Gadolinium ist ein Neutronengift, das, wenn es in Kernbrennelementbündeln verwendet wird, zwei Aufgaben erfüllt.

[0003] Einerseits erlaubt es die Herabsetzung der anfänglichen Reaktivität des Reaktorkerns (der Spaltzone) nach einer partiellen oder vollständigen Neubeladung mit neuen Brennelementbündeln aufgrund seines Absorptionsvermögens für Neutronen. Das allmähliche Verschwinden des Gadoliniums kompensiert das zunehmende Abbrennen des Brennelements.

[0004] Andererseits erlaubt es Dank einer geeigneten Verteilung der Brennelementbündel, die Gadolinium enthalten, im Kern (in der Spaltzone) des Kern-Reaktors die Erzielung einer regelmäßigeren radialen Verteilung der Reaktorleistung und das über einen ganzen Funktionszyklus des Reaktorkerns vor dem Nachladen.

[0005] Anfänglich wurden Brennelementbündel des Kernreaktors verwendet, deren vergiftete (abgebrannte) Stäbe den gleichen Massengehalt an Gadoliniumoxid (Gd_2O_3), im Allgemeinen zwischen 5 und 12%, aufwiesen. Es hat sich jedoch gezeigt, dass derartige Bündel eine zufrieden stellende Steuerung der Spaltzonen (Kerne) für längere Betriebszykluszeiten, insbesondere von mehr als 18 oder 24 Monaten, nicht erlauben.

[0006] In dem Dokument EP 0 799 484 wurde ein Brennelementbündel mit zwei Massengehalten an Gadoliniumoxid vorgeschlagen. In diesem Dokument ist angegeben, dass die anfängliche Anti-Reaktivität, die von dem Gadolinium beigetragen wurde, nicht proportional zu seinem Gehalt war, sondern mit dem Gehalt viel weniger schnell zunahm, sobald man einen Gehalt von etwa 1% überschritten hatte.

[0007] Dieses Dokument erteilt somit die Lehre, erste Brennstäbe mit einem ersten Massengehalt an Gadoliniumoxid zwischen 0,5 und 2% und zweite Brennstäbe mit einem zweiten Massengehalt zwischen 5 und 12% zu verwenden. Die ersten Brennstäbe erlaubten die Herabsetzung der anfänglichen Reaktivität in ausreichender Weise. Außerdem nahm aufgrund ihres geringen Gehaltes ihre Antireaktivität (negative Reaktivität) sehr schnell ab ab Beginn des

Betriebszyklus des Reaktors, sodass die ersten Brennstäbe der radialen Verteilung der Energie für den Rest des Zyklus nicht schadeten, wobei diese Verteilung dann durch die zweiten vergifteten (abgebrannten) Brennstäbe gesteuert werden konnten.

[0008] Es wurde jedoch festgestellt, dass diese Brennelementbündel eine vollständig zufrieden stellende Steuerung der Reaktorkerne bei besonders langen Betriebszyklen nicht erlaubten.

[0009] Insbesondere führen diese Bündel zu negativen Temperatur-Koeffizienten des Moderators, die, ausgedrückt als Absolutwert, zu niedrig sind.

[0010] Es sei daran erinnert, dass dieser Koeffizient die Zunahme der Kapazität des Moderators misst, d.h. die Fähigkeit des in dem Primärkreislauf des Reaktors zirkulierenden Kühlwassers, Neutronen zu absorbieren, wenn die Temperatur in dem Reaktorkern (in der Spaltzone) ansteigt. Dieser Koeffizient misst in irgendeiner Weise die Fähigkeit des Reaktorkerns, sich selbst abzuschalten.

[0011] Außerdem konnte festgestellt werden, dass der radiale Spitzenenergie-Faktor F_{xy} im Verlaufe des Zyklus über seinen Anfangswert hinaus wieder ansteigen konnte, d.h. über den Wert zu Beginn des Zyklus hinaus.

[0012] Es sei daran erinnert, dass der radiale Spitzenenergie-Faktor F_{xy} das Verhältnis zwischen der von einem Brennelement abgegebenen maximalen Leistung in dem Reaktorkern und der von den Brennstäben des Reaktorkerns abgegebenen mittleren Leistung darstellt. Dieser Faktor misst das Ungleichgewicht der Leistung, das zwischen den Brennstäben des Reaktorkerns besteht.

[0013] Diese Wiederanstiege des Faktors F_{xy} über seinen Anfangswert hinaus komplizieren die Steuerung der im Betrieb befindlichen Reaktoren, von denen man wünschen würde, dass zur Erzielung eines besseren Komforts das maximale Ungleichgewicht zu Beginn des Zyklus erreicht wäre.

[0014] Ein Ziel der Erfindung besteht darin, diese Probleme zu lösen, indem man eine sicherere und einfachere Steuerung der Kerne (Spaltzonen) von Druckwasser-Reaktoren ermöglicht.

[0015] Zu diesem Zweck betrifft die vorliegende Erfindung ein Brennelementbündel für einen Druckwasser-Reaktor, das erste Kernbrennelemente (Brennstäbe) mit einem ersten Massengehalt an Gadolinium und zweite Kernbrennelemente (Brennstäbe) mit einem zweiten Massengehalt an Gadolinium umfasst, wobei der zweite Gehalt höher ist als der erste Gehalt, wobei das Brennelementbündel dadurch gekennzeichnet ist, dass der erste Massengehalt stets

höher ist als 2%.

[0016] Nach bevorzugten Ausführungsformen der Erfindung kann das Brennelementbündel ein oder mehrere der nachstehend angegebenen Charakteristika aufweisen, die einzeln oder zusammengenommen alle technisch möglichen Kombinationen umfassen:

- der erste Massengehalt beträgt $\geq 2,1\%$,
- der zweite Massengehalt beträgt $\geq 2,2\%$,
- der dritte Massengehalt beträgt $\geq 2,5\%$,
- der vierte Massengehalt beträgt $\geq 3\%$,
- der erste Massengehalt beträgt $\geq 4\%$,
- der erste Massengehalt beträgt $\geq 5\%$ und der erste Massengehalt beträgt $\leq 8\%$.

[0017] Die Erfindung wird beim Lesen der nachstehenden Beschreibung, die lediglich der Erläuterung der Erfindung dient und in der Bezug genommen wird auf die beiliegenden Zeichnungen, besser verständlich, wobei in den beiliegenden Zeichnungen zeigen:

[0018] [Fig. 1](#) eine schematische Draufsicht, welche die Verteilung der Brennstäbe in einem ersten Bündel-Typ gemäß der Erfindung zeigt;

[0019] [Fig. 2](#) die Variation der Antireaktivität (negativen Reaktivität) eines Brennstabes in Abhängigkeit von seinem Gehalt an Gadolinium in zwei Brennelementbündeln, die jeweils ein mit 4,50% Uran 235 angereichertes Brennelementoxid (durchgezogene) Kurve bzw. ein mit 3,90% Uran 235 angereichertes Brennelementoxid (gestrichelte Kurve) zeigen,

[0020] [Fig. 3](#) eine Ansicht analog zu derjenigen der [Fig. 1](#), die zwei erfindungsgemäße Brennelementbündel erläutert, und

[0021] [Fig. 4](#) ein Diagramm bzw. eine schematische Darstellung, die eine mögliche Verteilung der Brennelementbündel gemäß den [Fig. 1](#) und [Fig. 3](#) in einem Viertel des Kerns eines Kernreaktors zeigt.

[0022] Die [Fig. 1](#) erläutert einen ersten Typ des Brennelementbündels **1** für einen Druckwasser-Reaktor (REP).

[0023] Die generelle Struktur dieses Bündels **1** ist klassisch und wird daher nicht näher beschrieben. Es sei einfach daran erinnert, dass das Bündel **1** Kernbrennelemente (Brennstäbe) und ein Trägergerüst zum Festhalten der Kernbrennelemente (Brennstäbe) an den Überkreuzungen eines regelmäßigen Gitters, in der Regel mit quadratischer Basis, umfasst.

[0024] Das Grundgerüst umfasst einen unteren Eingang, einen oberen Eingang und Führungsrohre **5**, welche diese beiden Eingänge miteinander verbinden und dazu bestimmt sind, die Brennstäbe eines Brennelementbündels zur Kontrolle der Funktion des

Kerns (der Spaltzone) des Kernreaktors aufzunehmen.

[0025] Das Grundgerüst umfasst außerdem Gitter **7** zum Festhalten der Brennstäbe. Diese Gitter **7** umfassen üblicherweise Gruppen von sich überkreuzenden Plaketten, die zwischen sich Zellen **9** begrenzen, die an den Überkreuzungen des regulären Netzes zentriert sind. Jede Zelle **9** dient dazu, einen Brennstab aufzunehmen, die zum größten Teil in der [Fig. 1](#) nicht dargestellt sind, oder ein Führungsrohr **5** aufzunehmen, wobei die zentrale Zelle **9** selbst ein Instrumentenrohr **11** aufnimmt.

[0026] In dem Beispiel gemäß [Fig. 1](#) umfassen die Festhaltegitter **7** 17 Zellen **9** pro Seite. Bei anderen Varianten kann die Anzahl der Zellen verschieden sein, beispielsweise 14×14 oder 15×15 betragen.

[0027] Die Zellen **9**, die in der [Fig. 1](#) als leer dargestellt sind, enthalten Kernbrennelemente (Brennstäbe), die kein Gadolinium enthalten. In der Regel enthalten diese Brennstäbe Uranoxid, das an dem Isotop 235 in einer Masse von 2,5% angereichert ist.

[0028] Das Brennelementbündel **1** umfasst über diese nicht vergifteten (nicht abgebrannten) Brennstäbe hinaus vergiftete (abgebrannte) Kernbrennelemente (Brennstäbe).

[0029] Insbesondere umfasst es vier erste Brennstäbe **15** mit einem ersten Massengehalt an Gadoliniumoxid und **16** zweite Brennstäbe **17** mit einem zweiten Massengehalt an Gadoliniumoxid, der höher ist als der erstgenannte Massengehalt. Die ersten Brennstäbe **15** sind durch Kreuze gekennzeichnet und die zweiten Brennstäbe sind durch Schraffierungen gekennzeichnet.

[0030] Wie in dem Patent EP 0 799 484 dargestellt und wie aus der beiliegenden [Fig. 2](#) ersichtlich, entwickelt sich der anfängliche Wirkungsgrad eines Brennstabes, der Gadolinium umfasst, nicht linear zu dem numerischen Wert seines Massengehaltes an Gadoliniumoxid.

[0031] Man erkennt beispielsweise in der [Fig. 2](#), dass bei einem Brennstab, der anfänglich mit 4,50% Uran 235 angereichert war, die durch 1% Gadolinium beigetragene Antireaktivität (negative Reaktivität) etwas mehr als 500 pcm (Teil pro 100 000) beträgt, während die von 8% Gadolinium beigetragene Antireaktivität (negative Reaktivität) nur etwa 750 pcm beträgt. Eine Verminderung des Anfangsgehaltes an Gadolinium in einem Verhältnis von 8 : 1 äußert sich somit nur in einer Abnahme der Antireaktivität (negativen Reaktivität) in einem Verhältnis von etwa 1,5 : 1. Die gestrichelte Kurve zeigt, dass dies auch der Fall ist für eine Anreicherung mit 3,9% Uran 235. Ein solches Verhalten kann auch festgestellt werden bei An-

reicherungen von Uran 235, die davon verschieden sind, beispielsweise mit Uran-Gehalten 235 von 2,5%.

[0032] Aus diesem Grund vermittelt das Dokument EP 0 799 484 die Lehre, einen ersten Massengehalt an Gadolinium von weniger als 2% zu verwenden.

[0033] Im Gegensatz zu dieser Lehre beträgt der erste Gehalt an Gadoliniumoxid (Gd_2O_3) hier 5 Massenprozent und der zweite Gehalt beträgt 10 Massenprozent. Die Brennstäbe **15** und **17** weisen darüber hinaus eine Anreicherung an Uran 235 von 2,5 Massenprozent auf.

[0034] Numerische Simulationen haben gezeigt, dass das Bündel **1** gemäß [Fig. 1](#) eine einfachere und sicherere Steuerung des Kerns (der Spaltzone) eines Kernreaktors ermöglicht. Zu diesem Zweck wurde der Betrieb eines mit Bündeln **1** des ersten Typs sowie mit Bündeln **21** des zweiten Typs, wie in [Fig. 3](#) erläutert, beladenen Kerns simuliert.

[0035] Diese Bündel **21** umfassen im Gegensatz zu den Bündeln **1** des ersten Typs nur acht Brennstäbe **17**. Die Verteilung der Brennstäbe **15** und **16** in den Bündeln **21** ist in der [Fig. 3](#) erläutert.

[0036] Die [Fig. 4](#) erläutert ein Viertel der Spaltzone (des Kerns) **23** des Kernreaktors, der eine Symmetrie vierter Ordnung aufweist. Die beiden Symmetrieachsen sind in der [Fig. 4](#) in strichpunktierter Form dargestellt.

[0037] So kann die Gesamtstruktur des Kerns (der Spaltzone) **23** von der einzigen [Fig. 4](#) abgeleitet werden.

[0038] Die weißen Quadrate zeigen die zu Beginn des Zyklus erneuerten Bündel, bei denen es sich um Bündel **1** vom ersten Typ, sowie um Bündel **21** vom zweiten Typ handelt. Man stellt fest, dass die Bündel **21** an der Peripherie des Kerns (der Spaltzone) angeordnet sind. Insgesamt umfasst der Kern (die Spaltzone) **23** 52 Bündel **1** und 20 Bündel **21**.

[0039] Die weniger dicht schraffierten Quadrate repräsentieren die Bündel, die bereits einen Zyklus durchlaufen haben und die gerade ihren zweiten Zyklus beginnen. Die stärker schraffierten Quadrate entsprechen den Bündeln, die bereits zwei Zyklen durchlaufen haben und die gerade ihren dritten und letzten Zyklus beginnen. Der Kern (die Spaltzone) **23** erlaubt die Durchführung eines verhältnismäßig langen Zyklus, in der Regel mit einer Länge von etwa 488 jepp (Tag entsprechend einer vollen Leistung).

[0040] Zu Beginn des Zyklus hat der radiale Leistungspeak-Faktor F_{xy} einen Wert von etwa 1,465 und der Temperatur-Koeffizient des Moderators be-

trägt $-3,7$ pcm/ $^{\circ}C$. Der Anfangswert des Faktors F_{xy} ist somit besonders hoch und insbesondere höher als mit Bündeln, die den Lehren von EP 0 799 484 entsprechen. Außerdem ist die Dauer, die erforderlich ist, um das Gadolinium der ersten Brennelemente **15** abzubrennen, höher als im Falle des Patents EP 0 799 484.

[0041] Der Wiederanstieg des Faktors F_{xy} im Verlaufe des Zyklus entsteht somit stärker verzögert und er weist eine viel niedrigere Amplitude auf, bezogen auf den Anfangswert des radialen Leistungspeak-Faktors F_{xy} .

[0042] Diese beiden Effekte sind zurückzuführen auf einen ersten Gehalt von stets mehr als 2% in den ersten Brennstäben **15**, der es insbesondere erlaubt, von einer Vergiftung durch die ersten Brennstäbe **15** verhältnismäßig lange zu profitieren.

[0043] Das Betreiben des Kerns (der Spaltzone) **23** ist daher einfacher, weil der maximale Wert des radialen Leistungspeak-Faktors F_{xy} zu Beginn des Zyklus zuverlässiger erscheint.

[0044] Desgleichen ist auch der Temperatur-Koeffizient des Moderators sehr niedrig, d.h. er hat einen hohen Absolutwert, was eine erhöhte Sicherheit beim Betrieb des Reaktorkerns **23** garantiert, ohne dass eine hohe Bor-Anfangskonzentration in dem in dem Primärkreislauf zirkulierenden Kühlmittel erforderlich ist.

[0045] Allgemein kann die Erfindung durchgeführt werden unter Anwendung von Werten für den ersten Massengehalt an Gadoliniumoxid (Gd_2O_3), die stets höher sind als 2%, beispielsweise 2,1%; 2,2%; 2,5%; 3%; 4%; 5%; 6%; 7%; 8%, ja sogar mehr betragen können.

[0046] Es wurde festgestellt, dass die besten Ergebnisse erhalten wurden mit Werten zwischen 4 und 6%.

[0047] Der zweite Gehalt an Gadoliniumoxid (Gd_2O_3), der höher ist als der erste Gehalt, kann seinerseits beispielsweise zwischen 5 und 15% liegen. Er kann somit 5%; 6%; 7%; 8%; 9%; 10%; 11%; 12%; 13%; 14% oder 15% betragen.

[0048] Die Anzahl der Brennstäbe **15** und **17** kann ebenfalls verschieden sein von den vorgenannten. Man kann beispielsweise Bündel **1** verwenden, die 8 Brennstäbe **15** und 12 Brennstäbe umfassen, und man kann Bündel **21** mit 8 Brennstäben **15** und 8 Brennstäben **17**, gegebenenfalls zusammen mit anderen Bündeln mit 8 Brennstäben **15** und 4 Brennstäben **17** verwenden.

[0049] Ganz allgemein kann die Anzahl und die An-

ordnung der Bündel, die Gadolinium enthalten, in dem Reaktorkern (der Spaltzone) **23** verschieden sein von derjenigen, wie sie in der [Fig. 4](#) dargestellt ist.

[0050] Desgleichen kann der Gehalt der Brennstäbe **15** und **17**, die Gadolinium enthalten, an Uran 235 verschieden sein von demjenigen der Brennstäbe, die kein Gadolinium enthalten, und er kann beispielsweise niedriger als dieser sein.

[0051] Ganz allgemein kann das Brennelement Uranoxid enthalten, das angereichert ist an dem Isotop 235 und/oder an Plutonium.

Patentansprüche

1. Brennelement-Bündel (Brennstoffkassette) (**1**, **21**) für einen Druckwasser-Reaktor, das (die) umfasst erste Kernbrennelemente (Brennstäbe) (**15**) mit einem ersten Massengehalt an Gadolinium und zweite Kernbrennelemente (Brennstäbe) (**17**) mit einem zweiten Massengehalt an Gadolinium, wobei der zweite Gehalt höher ist als der erste Gehalt, **dadurch gekennzeichnet**, dass der erste Massengehalt stets oberhalb 2% liegt.

2. Brennelement-Bündel nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass der erste Massengehalt $\geq 2,1\%$ ist.

3. Brennelement-Bündel nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, dass der erste Massengehalt $\geq 2,2\%$ ist.

4. Brennelement-Bündel nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, dass der erste Massengehalt $\geq 2,5\%$ ist.

5. Brennelement-Bündel nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, dass der erste Massengehalt $\geq 3\%$ ist.

6. Brennelement-Bündel nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, dass der erste Massengehalt $\geq 4\%$ ist.

7. Brennelement-Bündel nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, dass der erste Massengehalt $\geq 5\%$ ist.

8. Brennelement-Bündel nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass der erste Massengehalt $\leq 8\%$ ist.

Es folgen 2 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

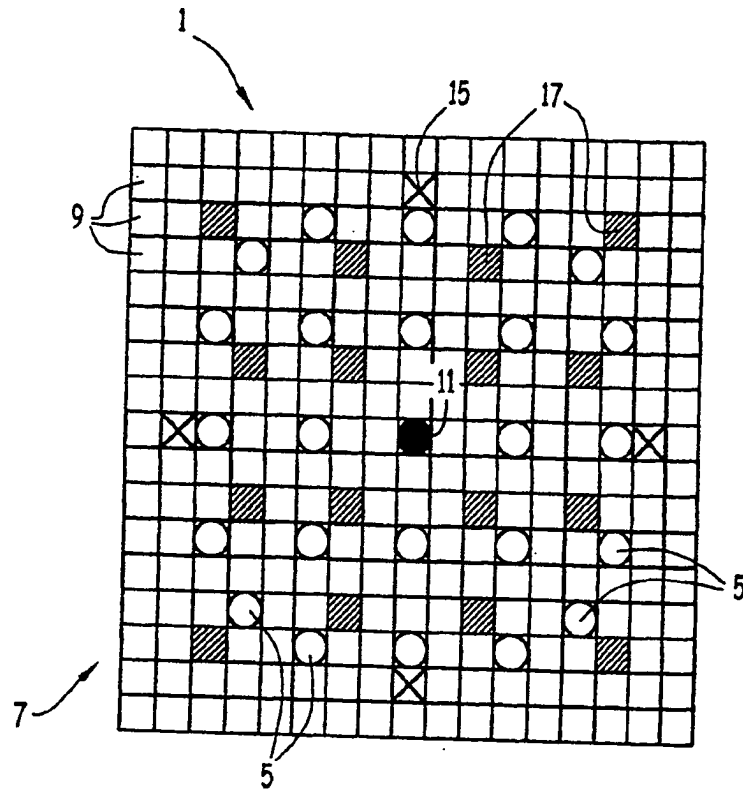


FIG.1

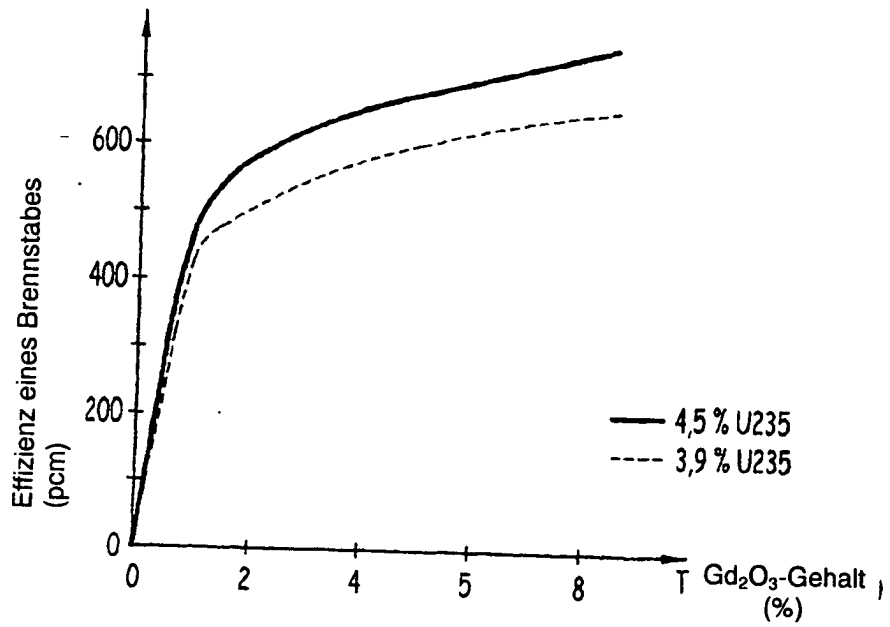


FIG.2

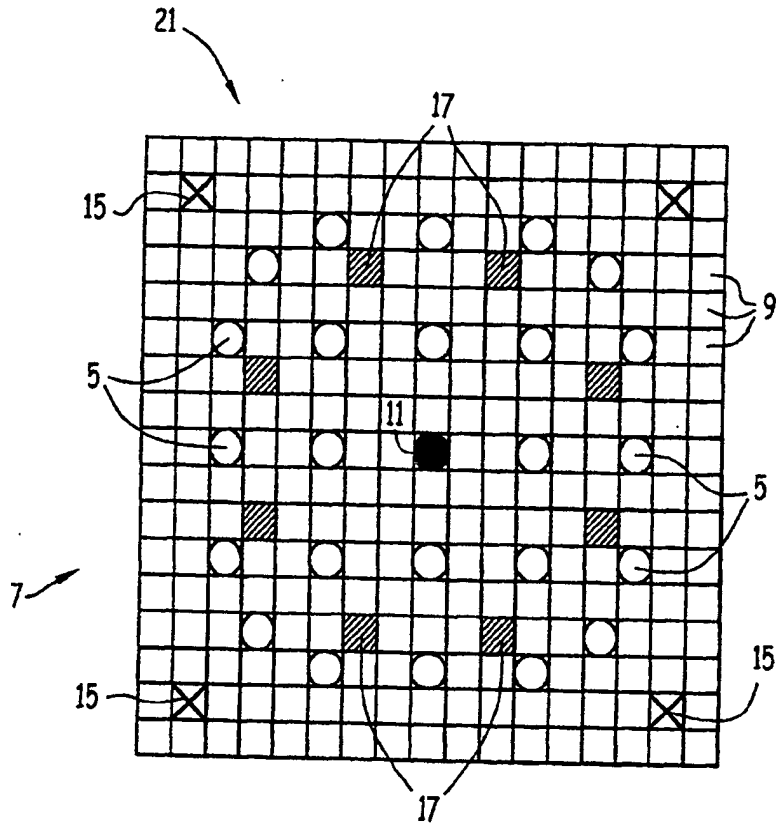


FIG. 3

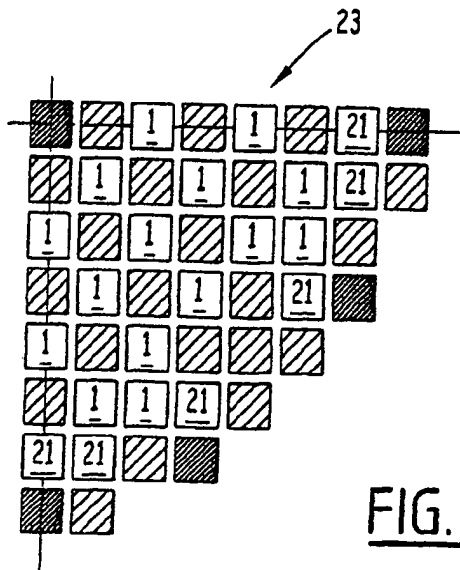


FIG. 4