



(10) **DE 10 2011 115 044 B4** 2017.01.05

(12)

## Patentschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2011 115 044.0**  
(22) Anmeldetag: **06.10.2011**  
(43) Offenlegungstag: **11.04.2013**  
(45) Veröffentlichungstag  
der Patenterteilung: **05.01.2017**

(51) Int Cl.: **G21F 5/005** (2006.01)  
**G21F 1/06** (2006.01)  
**G21F 5/06** (2006.01)  
**G21F 9/34** (2006.01)  
**G21F 9/36** (2006.01)

Innerhalb von neun Monaten nach Veröffentlichung der Patenterteilung kann nach § 59 Patentgesetz gegen das Patent Einspruch erhoben werden. Der Einspruch ist schriftlich zu erklären und zu begründen. Innerhalb der Einspruchsfrist ist eine Einspruchsgebühr in Höhe von 200 Euro zu entrichten (§ 6 Patentkostengesetz in Verbindung mit der Anlage zu § 2 Abs. 1 Patentkostengesetz).

(73) Patentinhaber:  
**SiCeram GmbH, 07751 Maua, DE**

(74) Vertreter:  
**Lorenz Seidler Gossel Rechtsanwälte  
Patentanwälte Partnerschaft mbB, 80538  
München, DE**

(72) Erfinder:  
**Kerber, Albert, Dr., 99425 Weimar, DE; Knorr,  
Jürgen, Prof. Dr., 01328 Dresden, DE**

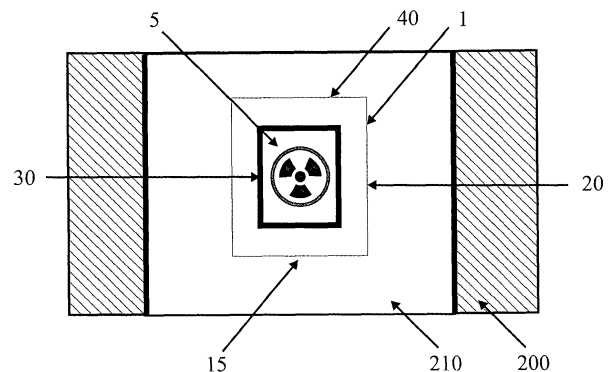
(56) Ermittelter Stand der Technik:

DE	103 27 708	A1
DE	10 2006 024 560	A1
EP	0 057 867	A1
EP	0 141 967	A1
WO	98/ 44 834	A1
RU	2 146 402	C1

Übersetzung RU 2146402 C1 (CI in RU&EN)  
Übersetzung RU 2146402 C1 (EB in RU&EN)

(54) Bezeichnung: **Keramischer Behälter und Verfahren zur Endlagerung von radioaktivem Abfall**

(57) Hauptanspruch: Keramischer Behälter (1) zur Endlagerung von radioaktivem Abfall (100), wobei der Behälter (1) Siliziumkarbid, vorzugsweise drucklos gesintertes Siliziumkarbid, aufweist oder daraus besteht, und an seiner Innenoberfläche eine zusätzliche Materialschicht (30) aufweist, dadurch gekennzeichnet, dass die zusätzliche Materialschicht an der Innenoberfläche Glaskohlenstoff umfasst oder daraus besteht.



**Beschreibung**

**[0001]** Die Erfindung betrifft einen keramischer Behälter zur Endlagerung von radioaktivem Abfall und ein Verfahren zur Endlagerung von radioaktivem Abfall, insbesondere ein Verfahren zur langzeitstabilen Endlagerung (hoch-)radioaktiver Abfälle durch keramische Kapselung.

**[0002]** Durch die Nutzung der Kernenergietechnik für zivile und militärische Zwecke sind seit Jahrzehnten radioaktive Abfälle entstanden und entstehen weiterhin. Sie enthalten vor allem künstliche, aber auch natürliche Radionuklide mit unterschiedlichen physikalischen und chemisch-toxischen Eigenschaften. Eine verantwortbare Nutzung kerntechnischer Verfahren erfordert, dass der Umgang mit radioaktiven Materialien in allen Verfahrensschritten von der Erzeugung der Radionuklide bis zu deren Beseitigung gefahrlos für Mensch und Umwelt gestaltet werden kann. Insbesondere die Nutzung der Kernspaltung in sogenannten Kernreaktoren ist unvermeidbar mit der Erzeugung beträchtlicher Mengen von (hoch-)radioaktiven Abfällen verbunden. Diese radio-toxischen Abfälle müssen nach Möglichkeit vollständig von der Biosphäre isoliert werden. Die Radiotoxizität verringert sich im Laufe der Zeit von selbst durch den radioaktiven Zerfall.

**[0003]** Die Entsorgung radioaktiver Abfälle muss den Schutz der menschlichen Gesundheit und der Umwelt heute und in Zukunft sicherstellen, ohne zukünftige Generationen in unzumutbarer Weise zu belasten.

**[0004]** Die Endlagerung von (hoch-)radioaktivem, wärmeentwickelndem Abfall stellt eine besondere Herausforderung dar. Trotz vielversprechender Ansätze gibt es bis heute kein endgültig akzeptiertes Konzept für eine derartiges Endlager. Es wurden aber eine Reihe von Grundsätzen und Kriterien entwickelt, die für die langzeitstabile Endlagerung (hoch-)radioaktiver Abfälle als verbindlich angesehen werden:

- Es besteht heute international Einvernehmen dafür, dass für den Schutz von Mensch und Umwelt ein sicherer Einschluss des (hoch-)radioaktiven Abfalls für 1 Million Jahre (Nachweiszeitraum) gewährleistet werden muss.
- Die Endlagerung sollte in tiefen geologischen Formationen (Untertage-Deponien) erfolgen.
- Der langzeitstabile Einschluss wird gewährleistet durch eine Kombination aus natürlichen und technischen Barrieren, bekannt als Mehr- oder Vielbarrieren-Konzept.

**[0005]** Das Wirtsgestein des Endlagers bildet die geologische Barriere, gegebenenfalls im Zusammenwirken mit dem Deckgebirge. Die (geo-)technische Barriere dagegen besteht aus dem Behälter für den radioaktiven Abfall und dem Material, mit dem die

Hohlräume im Wirtsgestein nach Einlagerung der Abfallbehälter verfüllt werden.

**[0006]** Der Transport des radioaktiven Materials aus dem Endlager in die Biosphäre ist denkbar vor allem durch Diffusion und Konvektion, aber auch durch menschliche Einwirkung. Der Zutritt von Wasser oder anderen Fluiden in das Endlager beschleunigt die Korrosion der Abfallbehälter und die Auslaugung der Abfallgebände sowie den Transport des radioaktiven Materials.

**[0007]** Als Endlager-Gebinde haben sich bisher einige wenige Varianten als technisch machbar sowie wirtschaftlich vertretbar und damit als aussichtsreich herauskristallisiert:

- Behälter aus Metall (Gußeisen, Kupfer) für Kernreaktor-Brennelemente ohne Wiederaufbereitung,
- Verglasung von Abfällen aus der Wiederaufbereitung und Einsetzen der Glaskokillen in Edelstahlkanistern.

**[0008]** Als Obergrenze für die Integrität metallischer Behälter werden heute 1000 Jahre angesetzt. Bei anaerober Korrosion ist zusätzlich die Möglichkeit der Bildung von explosiven Wasserstoff-Luftgemischen gegeben, wodurch bei einer Verpuffung Risse im Wirtsgestein und damit Wegsamkeiten für den Wasserzutritt entstehen können.

**[0009]** Als geeignete Glassorte für die Verglasung radioaktiver Abfälle wird Borsilikatglas angesehen. Bei Zutritt von Fluiden erfolgt eine Auslaugung. Selbst optimistische Schätzungen gehen von einer totalen Auslagerung innerhalb von 1000 Jahren aus. Somit bieten beide derzeit in Betracht gezogenen Varianten der Abfallbehälter keinen Langzeitschutz bei korrosivem Angriff.

**[0010]** Aufgrund der derzeit nicht ausreichend langzeitstabilen Behälter vertraut man heute noch vor allem auf die Rückhaltefunktion des Wirtsgesteins. Danach werden für (hoch-)radioaktiven, Wärme entwickelnden Abfall als natürliche Barrieren geeignete Wirtsgesteine – meist in tiefen geologischen Formationen – in Betracht gezogen. Durch eine Reihe von Auswahlkriterien reduziert sich die Zahl der in Betracht kommenden Wirtsgesteine auf wenige Formationen, nämlich Salz, Ton und Granit.

**[0011]** Es besteht mittlerweile Einvernehmen, dass es nicht das ideale Wirtsgestein gibt. Mit anderen Worten: für keines der in Betracht gezogenen Wirtsgesteine kann für den Nachweiszeitraum die Rückhaltefunktion der natürlichen Barriere als sicher vorausgesetzt werden. Damit sind Transportpfade für Radionuklide zwischen den Abfallgebänden und der Biosphäre sind nur denkbar, sondern als wahrscheinlich anzunehmen.

**[0012]** Aus dieser Erkenntnis ergibt sich für die Einschätzung der Langzeitstabilität eines Endlagers, das nach dem derzeitigen Stand von Wissenschaft und Technik erreicht wird, die folgende Schlussfolgerung: Bereits nach Zeiten, die nur einen Bruchteil des Nachweiszeitraumes betragen, kommt es zu Barriere-Verlusten mit der Folge der begrenzten oder totalen Freisetzung von Radionukliden aus den jeweiligen Barrieren. Der Anspruch der Rückhaltung durch mehrere intakte, gestaffelt wirkende Barrieren kann bereits nach Zeiten, die wesentlich kleiner sein können als der Nachweiszeitraum, nicht mehr aufrecht erhalten werden. Beruht die Genehmigung des Endlagers auf dem Mehrbarrieren-Konzept, dann bedeutet der absehbare teilweise bzw. totale Barriere-Verlust den Verlust der Genehmigungsvoraussetzungen und damit vice versa die Unzulässigkeit der Genehmigung.

**[0013]** Der Stellenwert des Behälters im sogenannten Mehrbarriere-System für die Langzeitsicherheit des Endlagers wird gegenwärtig völlig unterbewertet. Dementgegen ist der Behälter für den gesamten Nachweiszeitraum (1 Mio. Jahre) als integraler, unverzichtbarer Bestandteil des Mehrbarrierenkonzepts anzusehen und demzufolge entsprechend auszulegen.

**[0014]** Hieraus ergeben sich Forderungen an innovative Lösungen für den Behälter. Dabei soll unter anderem der Einsatz von Metallen in Endlagern vermieden werden, und es sollen technische Immobilisationsbarrieren geschaffen werden, die ihre Funktionalität über den gesamten Nachweiszeitraum behalten.

**[0015]** Aus der WO 98/44834 A1 ist ein keramischer Behälter für die Endlagerung radioaktiver Abfälle mit Verstärkungsfasern aus Siliziumkarbid bekannt, der an seiner inneren Oberfläche wenigstens eine zusätzliche Materialschicht aufweist.

**[0016]** Aus der RU 2 146 402 C1 ist ein weiterer und mehrschichtiger Behälter für die Endlagerung radioaktiver Abfälle bekannt, wobei wenigstens eine der Behälterschichten aus Siliziumkarbid besteht.

**[0017]** Aufgabe der Erfindung ist es, einen verbesserten Behälter und ein Verfahren zur langzeitstabilen Endlagerung von (hoch-)radioaktivem Abfall bereitzustellen.

**[0018]** Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß mit einem Behälter gemäß Anspruch 1 gelöst.

**[0019]** Demgemäß wird ein Behälter vorgeschlagen, der aus einem keramischen Material besteht, der sich zur Endlagerung von radioaktivem Abfall eignet. Dieses keramische Material ist nicht metallisch. Vorzugsweise umfasst der Behälter auch keinerlei metallische Bauteile oder Komponenten oder Beimischun-

gen. Erfindungsgemäß weist der Behälter Siliziumkarbid auf oder besteht daraus, und weist an seiner Innenoberfläche eine zusätzliche Materialschicht auf. Vorzugsweise weist das eingesetzte Siliziumkarbid keine offenen Poren auf, sodass es eine hohe Gasdichte aufweist und im Wesentlichen gasundurchlässig ist.

**[0020]** Der Behälter weist typischerweise einen Behälterkörper und wenigstens einen passgenau auf diesen Behälterkörper abgestimmten Deckel auf. Der Behälter, ggf. der Behälterkörper und der Deckel definieren einen Hohlraum, der den Innenraum des Behälters darstellt und zur Aufnahme des radioaktiven Materials dient. Dieser Innenraum ist bei versiegeltem Deckel bestimmungsgemäß fluiddicht von der Außenwelt abgeschnitten. Der Behälterkörper hat vorzugsweise eine hohlzylindrische Form, wobei der Deckel eine Stirnseite des Hohlzylinders abdecken kann. Selbstverständlich sind jedoch auch andere, zweckmäßige Gestalten denkbar.

**[0021]** In einer Ausführungsform wird der gesamte Innenraum des Behälters durch die zusätzliche Materialschicht ausgekleidet.

**[0022]** Der Behälter kann beispielsweise zur Aufnahme von Glaskokillen, d. h. verglasten radioaktiven Abfälle, Brennstäben oder Brennstabsegmenten, oder Kugel-Brennelementen (Pebbles) dienen, die gegebenenfalls zum Zwecke der Lagerung im Innenraum in einer Graphitmatrix eingebettet sind.

**[0023]** In einer Ausführungsform wird als Behältermaterial drucklos gesintertes Siliziumkarbid verwendet, an dessen Innenoberfläche (d. h. an der dem Hohlraum zugewandten Oberfläche) eine zusätzliche Materialschicht aufgetragen ist.

**[0024]** Siliziumkarbid weist günstige Eigenschaften für eine derartige Anwendung auf. Es besitzt eine sehr hohe Korrosions- und Temperaturbeständigkeit, sowie eine hohe Wärmeleitfähigkeit und Thermoschockbeständigkeit. Siliziumkarbid ist ferner extrem hart und auch unempfindlich gegen Strahlung. Drucklos gesintertes Siliziumkarbid weist eine hohe Gasdichte auf, da es keine offenen Poren hat. Am Siliziumkarbid findet keine Korrosion oder Auslaugung statt. Eine Gasbildung durch anaerobe Korrosion, wie sie bei metallischen Behältern beobachtet wird, wird vermieden.

**[0025]** Eine der wichtigsten Kenngrößen eines Behälters bei der Endlagerung von radioaktivem Abfall stellt die Diffusionsgeschwindigkeit der radioaktiven Elemente durch dessen Wände dar. Diese Diffusionsgeschwindigkeit hängt im Wesentlichen von der Stärke der Behälterwände und dem Diffusionskoeffizienten der betreffenden Nuklide im Wandmaterial

dar. Der Diffusionskoeffizient ist wiederum temperaturabhängig.

**[0026]** Die Durchbruchzeit von Nukliden durch die Wandbarriere kann über die Formel  $t_B = L^2/6D$  angenähert werden, wobei  $t_B$  die Durchbruchzeit,  $L$  die Wanddicke und  $D$  der Diffusionskoeffizient ist. In Siliziumkarbid konnte in verschiedenen Studien für viele gängigen radioaktiven Isotope eine sehr geringe Diffusionsrate bei entsprechenden Arbeitstemperaturen festgestellt werden, in der Regel von weniger als  $10^{-17} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ . Unter der Voraussetzung, dass die Durchbruchzeit mindestens 1 Million Jahre, d. h. in etwa  $10^{13}$  Sekunden betragen soll, so ergibt sich, dass bereits eine Wanddicke von 1 cm für eine entsprechende Retention ausreichend wäre. Für die Bestimmung des Diffusionskoeffizienten spielt nur das Konzentrationsgefälle der jeweils betrachteten Nuklidsorte an der Behälterwand eine Rolle. Die Diffusionsvorgänge der verschiedenen Nuklidsorten beeinflussen sich nicht gegenseitig (Superpositionsprinzip).

**[0027]** Die zusätzliche Materialschicht an der Innenoberfläche des Behälters umfasst Glaskohlenstoff (glassy carbon) oder besteht daraus. Glaskohlenstoff ist für diesen Anwendungszweck besonders geeignet, da er hochtemperaturbeständig ist, und eine hohe Härte und Thermobeständigkeit aufweist. Ferner ist Glaskohlenstoff extrem resistent gegenüber chemischen Attacken und besitzt eine geringe Durchlässigkeit für Gase und andere Fluide. Auch ist Glaskohlenstoff ein sehr guter elektrischer Leiter. Die Diffusionsgeschwindigkeit gängiger Nuklidsorten in Glaskohlenstoff ist sehr gering.

**[0028]** Ohne diese zusätzliche Barriere ist die Diffusion in der eben beschriebenen Art und Weise im Wesentlichen durch das Konzentrationsgefälle an der Behälterwand bestimmt. Als Arbeitshypothese für die Funktionsfähigkeit einer derartigen durch die zusätzliche Materialschicht gebildete Diffusionsbarriere wird derzeit angenommen, dass die diffundierenden Nuklide aufgrund des intensiven Strahlungsfeldes im Inneren des Behälters ionisiert werden, wobei frei werdende Elektronen über die leitfähige Wand abgeleitet werden. Die Materialschicht an der Innenoberfläche des Behälters wird so zu einer Ionenfalle. Es kommt daher zum Aufbau einer Coulombbarriere die, unabhängig von der Nuklidsorte, auf alle nachrückenden Ionen (ebenfalls ionisierten Nuklide) wirkt und damit auch die konzentrationsabhängige Diffusion aller Nuklidsorten hemmt.

**[0029]** In einer Ausführungsform beträgt die Wandstärke des Behälters aus Siliziumkarbid zwischen 0,5 und 10 cm, vorzugsweise zwischen 1 und 5 cm. Die Schichtdicke der als Diffusionsbarriere wirkenden zusätzlichen Materialschicht kann beispielsweise zwischen 1  $\mu\text{m}$  und 5 mm, vorzugsweise zwischen 1,5  $\mu\text{m}$  und 1 mm betragen. In einer Ausführungsform ist

die Schichtdicke der zusätzlichen Materialschicht an der Innenoberfläche geringer als die Stärke der Behälterwand aus Siliziumkarbid.

**[0030]** In einer Ausführungsform stellt der erfindungsgemäße Behälter einen Innenbehälter dar, der von außen zusätzlich von einem oder mehreren Behältern aus Metall oder keramischen Baustoffen umgeben wird. Der Behälter kann auch integral mit weiteren Mantelschichten aus Metall oder keramischen Baustoffen verbunden sein. Geeignete Metalle umfassen beispielsweise Edelstahl, Gusseisen, Kupfer und dergleichen. Geeignete keramische Baustoffe umfassen beispielsweise Silikate. Diese zusätzlichen Schichten bzw. Außenbehälter können die Stabilität, Handhabbarkeit und dergleichen des erfindungsgemäßen Behälters erhöhen und je nach Ausbildung eine zusätzliche geotechnische Barriere für den Einschluss des radioaktiven Abfalls darstellen.

**[0031]** Die Erfindung betrifft ferner ein Verfahren zur Endlagerung von radioaktivem Abfall. Dieses Verfahren umfasst das Einbringen des radioaktiven Abfalls in einen erfindungsgemäßen Behälter und das gasdichte Verschließen des Behälters.

**[0032]** Der radioaktive Abfall kann beispielsweise in der Form von gegebenenfalls gestückelten Brennstäben, Glaskokillen oder Kugel-Brennelementen eingebracht werden. Er kann vor, während oder nach der Einbringung gegebenenfalls in eine Graphitmatrix eingeschlossen oder mit Graphit oder anderen Materialien umfüllt werden. Auch die Zugabe von Buffer-Elementen zwischen dem gelagerten Material und den Behälterwänden kann vorgesehen sein, um einen direkten Kontakt, welcher zu mechanischen oder thermischen Beschädigungen am Behälter führen könnte, zu unterbinden.

**[0033]** Durch das gasdichte Verschließen, welches elementar für das erfindungsgemäße Verfahren ist, wird ein Zusammentritt von radioaktivem Material und Fluiden, über welche das radioaktive Material nach außen gelangen könnte, effektiv verhindert.

**[0034]** In einer Ausführungsform erfolgt das gasdichte Verschließen des Behälters durch das Verbinden eines Grundkörpers und eines Deckels des Behälters durch ein Laser-Fügeverfahren, d. h. durch eine thermische Verbindung zweier aufeinander abgestimmter Flächen durch Lasereinwirkung. Aufeinanderliegende Oberflächen des Grundkörpers und Deckels werden dabei durch die Einwirkung eines Lasers erweicht bzw. aufgeschmolzen, und bilden eine Fügenaht. So wird eine hochschmelzende, thermoschockbeständige Glasnaht zwischen den Siliziumkarbidbausteinen erhalten. Es ist vorzugsweise keine Präparierung oder Metallisierung der keramischen Oberfläche, und/oder kein Vorheizen vorgesehen bzw. notwendig. Das Laser-Fügeverfahren weist

kurze Prozesszeiten auf und resultiert in dünnen Nähten, die typischerweise keine Poren oder Risse aufweisen und darüber hinaus eine sehr geringe Heliumdiffusionsrate (vorzugsweise kleiner  $10^{-8}$  mbar-l/s) und eine sehr hohe mechanische Festigkeit (vorzugsweise jenseits von 70% der Festigkeit der verbleibenden Sic-(Matrix) aufweisen. Die Stärke der Glasnaht ist vorzugsweise geringer als 200  $\mu\text{m}$ , weiter vorzugsweise geringer als 100  $\mu\text{m}$ .

**[0035]** Unabhängig von oder zusätzlich zu der gasdichten Verbindung durch das Laser-Fügeverfahren kann das gasdichte Verschließen in einer Ausführungsform durch ein Aneinanderpressen des Deckels und des Grundkörpers durch äußeren und/oder inneren Druck, vorzugsweise durch äußeren Druck eines den Behälter umgebenden Füllmaterials oder Wirtsgesteins erfolgen. Dabei ist typischerweise vorgesehen, dass die Berührungsflächen eines Grundkörpers und eines Deckels des Behälters so gestaltet sind, dass sie formschlüssige Anpressflächen umfassen.

**[0036]** Unabhängig von oder zusätzlich zu einer oder beiden der vorgenannten Maßnahmen kann in einer Ausführungsform die Berührungsfläche, der Berührungsbereich und/oder die Fügenaht zwischen einem Grundkörper und einem Deckel des Behälters mit einer keramischen Masse abgedichtet werden, um einen gasdichten Verschluss bereitzustellen oder zusätzlich zu verbessern.

**[0037]** In einer Ausführungsform kann durch Lasergravur oder andere Gravur auf der Außenseite des Behälterkörpers und/oder des Deckels eine geeignete Symbolik aufgebracht werden, um den Inhalt des Behälters dauerhaft zu kennzeichnen. Dabei ist denkbar, dass die Gravur so angebracht wird, dass sie sich über den Berührungsbereich zwischen dem Behälterkörper und dem Deckel erstreckt, und so als Siegel wirkt. In dieser Weise kann jede nachträgliche Öffnung des Behälters erkannt werden.

**[0038]** In einer Ausführungsform umfasst das Verfahren ferner die Einlagerung des verschlossenen Behälters in ein Wirtsgestein. Geeignete Wirtsgesteine umfassen beispielsweise Salz, Granit oder Ton. Dadurch wird zusätzlich zur technischen Barriere eine geologische Barriere erzeugt. Die Einlagerung des verschlossenen Behälters kann gegebenenfalls nach einer Kennzeichnung und/oder Ummantelung und/oder Zusammenfassung mehrerer Behälter und/oder Einbringung in weitere Behälter erfolgen.

**[0039]** In einer Ausführungsform umfasst das erfindungsgemäße Verfahren ferner das Verfüllen des eingelagerten Behälters mit einem geeigneten Füllmaterial. Geeignete Füllmaterialien umfassen beispielsweise Kiesel, Salz und dergleichen.

**[0040]** In einer Ausführungsform können mehrere Behälter vor der Einlagerung in das Wirtsgestein und der Verfüllung zu Gebinden zusammengefasst werden, beispielsweise durch Gewebe aus keramischen Fasern. Anschließend können die Gebinde, wie oben im Zusammenhang mit den Behältern beschrieben, in das Wirtsgestein eingelagert und gegebenenfalls verfüllt werden.

**[0041]** In einer Ausführungsform können ein oder mehrere Behälter in Container, beispielsweise Container aus mit Keramikfasern verstärktem Beton oder anderen silikatischen Materialien derart eingesetzt werden, dass Abstände zwischen den Behältern und den Containerwänden eingehalten werden. Die Zwischenräume innerhalb der Container können durch Verfüllen mit geeigneten Materialien, beispielsweise keramischen Materialien wie Betonit ausgefüllt werden. Anschließend können die Container, wie oben im Zusammenhang mit den Behältern beschrieben, in das Wirtsgestein eingelagert und gegebenenfalls verfüllt werden.

**[0042]** Weitere Einzelheiten und Vorteile der Erfindung ergeben sich aus den nachfolgend anhand der Figuren beschriebenen Ausführungsbeispiele. In den Figuren zeigen:

**[0043]** Fig. 1: eine Außenansicht eines erfindungsgemäßen Behälters,

**[0044]** Fig. 2: eine Schnittdarstellung eines erfindungsgemäßen Behälters,

**[0045]** Fig. 3: Schnittdarstellungen eines erfindungsgemäßen Behälters mit radioaktiven Abfällen im Innenraum,

**[0046]** Fig. 4: eine schematische Darstellung eines erfindungsgemäßen Behälters im Endlager,

**[0047]** Fig. 5: eine schematische Veranschaulichung einer Arbeitshypothese zur Wirkungsweise der zusätzlichen Materialschicht an der Innenoberfläche des erfindungsgemäßen Behälters als Diffusionsbarriere,

**[0048]** Fig. 6: eine Explosionsdarstellung eines erfindungsgemäßen Behälters samt Inhalt sowie eine Darstellung zu dessen gasdichten Verschließen mittels Laser-Fügeverfahren,

**[0049]** Fig. 7: eine Abbildung eines versiegelten erfindungsgemäßen Behälters,

**[0050]** Fig. 8: vergrößerte Darstellungen einer Glasnaht zwischen Grundkörper und Deckel eines erfindungsgemäßen Behälters nach deren Laser-Versiegelung,

**[0051]** Fig. 9: eine Lasergravur an der Außenseite eines erfindungsgemäßen Behälters, und

**[0052]** Fig. 10: verschiedene Einlagerungsformen erfindungsgemäßer Behälter in Endlagern.

**[0053]** Fig. 1a zeigt den Grundkörper **10** eines erfindungsgemäßen Behälters **1** in einer perspektivischen Außenansicht. Der Grundkörper **10** weist eine hohlzylindrische Form mit einem Innenraum **5** und einer Mantelfläche **20** auf. An der Unterseite ist der Grundkörper **10** durch eine Bodenplatte **15** (in Fig. 1a nicht dargestellt), die integral mit der Mantelfläche **20** gefertigt ist, verschlossen. Mantelfläche **20** und Bodenplatte **15** bestehen aus drucklos gesintertem Siliziumkarbid.

**[0054]** Fig. 1b zeigt den in Fig. 1a dargestellten Behälterkörper **10** gemeinsam mit einem Deckel **40**, welche sich gemeinsam zu einem erfindungsgemäßen Behälter **1** ergänzen. Der Deckel **40** weist eine kreisrunde, plattenförmige Gestalt auf, wobei der Durchmesser des Kreises dem Außendurchmesser des hohlzylinderförmigen Behälterkörpers **10** entspricht. Der Deckel **40** ist, wie auch der Behälterkörper **10**, aus drucklos gesintertem Siliziumkarbid gefertigt. Die obere Abschlußkante des Behälterkörpers **10** ist so ausgebildet, dass eine horizontale, glatte Fläche gebildet wird, auf der der plattenförmige Deckel **40** aufliegt und im Verlauf eines erfindungsgemäßen Verfahrens gasdicht verbunden werden kann.

**[0055]** Fig. 1c zeigt den in Fig. 1b dargestellten Behälter **1**, wobei der Deckel **40** nahtlos auf dem Behälterkörper **10** aufliegt.

**[0056]** In Fig. 2 ist eine weitere Ausführungsform eines erfindungsgemäßen Behälters **1** in einer Schnittdarstellung gezeigt, sodass der Innenraum **5** und die Bodenplatte **15** des Behälterkörpers sichtbar werden. Der Behälterkörper ist so ausgebildet, wie dies bereits im Zusammenhang mit Fig. 1a beschrieben wurde. Auf die dortige Beschreibung wird insoweit verwiesen. Der Deckel **40** des Behälters **1** weist auch in dieser Ausführungsform eine kreisförmige Platte auf, wie diese in Zusammenhang mit Fig. 1b beschrieben wurde. Ferner weist der Deckel einen Fortsatz **41** auf, der ebenfalls die Gestalt einer kreisförmigen Platte hat, an der Unterseite, d. h. an der dem Innenraum **5** zugewandten Seite des plattenförmigen Teils des Deckels **40** direkt an diesen anschließt. Der plattenförmige Teil und der Fortsatz **41** sind konzentrisch und parallel zueinander angeordnet. Der Außendurchmesser des Fortsatzes **41** entspricht dem Innendurchmesser des hohlzylindrischen Behälterkörpers **10**. Der Fortsatz **41** wird beim Verschließen des Behälters **1** in den oberen Bereich der Ausnehmung **5** eingeführt, sodass die Seitenflächen des Fortsatzes **41** formschlüssig an der Innenoberfläche des Mantels **20** anliegen. Wenn nun von außen ein Druck auf

den Mantel **20** des Behälterkörpers wirkt, so werden dessen Innenflächen durch eine, trotz der extremen Härte des Siliziumkarbids stattfindenden, geringfügigen Materialverformung an die Seitenoberfläche des Fortsatzes **41** gepresst. So kann eine Fluidbarriere entstehen.

**[0057]** Fig. 3a zeigt die im Zusammenhang mit Fig. 1a bis Fig. 1c beschriebene Ausführungsform eines erfindungsgemäßen Behälters in einer Schnittdarstellung, sodass die Bodenplatte **15** und der Innenraum **5** sichtbar sind. In Fig. 3b bis Fig. 3d sind im inneren Hohlraum **5** des Behälters **1** verschiedene Formen (**100**, **100a**, **100b**) radioaktiven Abfalls **100** eingelagert. In Fig. 3b ist das eingelagerte, radioaktive Material eine Glaskokille **100**, welche durch Verglasung von Abfällen aus der Wiederaufbereitung von Kernreaktor-Brennelementen erhalten werden.

**[0058]** In Fig. 3c sind Segmente **100a** von verbrauchten Brennstäben eines Kernreaktors eingelagert, die durch Zerkleinern dieser Brennstäbe erhalten werden. In Fig. 3d sind ausgebrannte Kugel-Brennelemente **100b** (Pebbles) eingelagert. Zur Stabilisierung dieser Pebbles im Innenraum **5** sind diese in eine Graphitmatrix **101** eingebettet. Die Graphitmatrix **101** bewirkt, dass die Pebbles **100b** im Innenraum **5** ortsfest gehalten werden, und dass eine Berührung mit den Behälterwänden **20** vermieden wird.

**[0059]** Fig. 4 zeigt eine schematische Darstellung eines erfindungsgemäßen Behälters **1** in einer Endlagerstätte. Die Endlagerstätte ist schematisch durch Gestein **200** dargestellt, das ein Bohrloch **210** aufweist. Der Behälter **1** weist einen hohlzylinderförmigen Mantel **20**, eine integral mit diesem gefertigte Bodenplatte **15**, und einen mit dem Mantel **20** laser-verschlossenen Deckel **40** auf. Durch Bodenplatte **15**, Mantel **20** und Deckel **40** wird der Hohlraum **5** definiert, in dem radioaktives Material eingelagert ist. Die Innenoberflächen sowohl des Mantels **20** als auch des Bodens **15** und Deckels **40** sind jeweils mit einer zusätzlichen Materialschicht aus Glaskohlenstoff ausgekleidet. Die Auskleidung **30** ist vollflächig, sodass der komplette Innenraum **5** von einer Glaskohlenstoffschicht **30** umgeben ist. Diese stellt eine zusätzliche Diffusionsbarriere für radioaktive Elemente dar.

**[0060]** Fig. 5 zeigt eine schematische Veranschaulichung einer Arbeitshypothese zur Wirkungsweise der zusätzlichen Materialschicht an der Innenoberfläche des erfindungsgemäßen Behälters als Diffusionsbarriere. Radioaktive Nuklide **310** im Innenraum **5** des Behälters diffundieren in Abwesenheit dieser zusätzlichen Diffusionsschicht, wie dies in der oberen Hälfte der Figur dargestellt ist, unabhängig voneinander und getrieben durch den Konzentrationsgradienten, durch die Siliziumkarbidschicht **20**. Dabei durchwandern die Nuklide zunächst die Siliziumkarbidschicht

**20** (Nuklid **311**) und verlassen den Behälter anschließend nach außen (Nuklid **312**). Durch die niedrigen Diffusionskoeffizienten der radioaktiven Nuklide in Siliziumkarbid ist diese Diffusion sehr langsam. Dennoch ist es ein Anliegen, diese Diffusion weiter zu unterbinden. Durch das Anbringen einer zusätzlichen Materialschicht **30** aus Glaskohlenstoff, wie dies in der unteren Hälfte der **Fig. 5** dargestellt ist, entsteht eine zusätzliche Diffusionsbarriere. Radioaktive Nuklide **310** im Innenraum **5** des Behälters dringen zunächst in diese Diffusionsbarriere ein (Nuklid **312**), und werden im weiteren Verlauf durch die herrschende radioaktive Strahlung ionisiert, d. h. Elektronen werden aus der Elektronenhülle der betreffenden Elemente herausgeschlagen. Durch die elektrisch leitenden Eigenschaften des Glaskohlenstoffs werden diese herausgeschlagenen Elektroden abgeleitet, und die zurückbleibenden Nuklide stellen einzelne, positive Ladungsträger dar, die in der Schicht eingelagert bleiben (Nuklid **316**). Dadurch entsteht eine positiv geladene Schicht, die auf weitere durch Ionisierung positiv aufgeladene Teilchen (Nuklid **320**) abstoßend wirken. So können im Vergleich zum Fehlen der zusätzlichen Materialschicht nur mehr wenige Nuklide (Nuklid **317**) diese Barriere passieren, sodass die Diffusion insgesamt abnimmt.

**[0061]** In **Fig. 6** ist in der linken Darstellung eine Explosionsdarstellung eines gefüllten Behälters **1** gezeigt. Der Behälter weist einen Behälterkörper **10** und einen Deckel **40** auf, die im Zusammenhang mit **Fig. 1** näher erläutert wurden. Im Innenraum des Behälters ist radioaktiver Abfall **100** eingelagert, der, um eine stabilere Lagerung im Innenraum zu gewährleisten, von Bufferkörpern **105** umgeben ist. Die Bufferkörper **105** sind in der Abbildung als oberhalb und unterhalb des radioaktiven Materials **100** liegende, tablettenförmige Polsterkörper dargestellt. Es versteht sich, dass Pufferkörper auch zwischen verschiedenen Einlagerungen und zwischen den Einlagerungen **100** und der Mantelfläche des Behälters angebracht werden können.

**[0062]** In der rechten Darstellung der **Fig. 6** wird schematisch das gasdichte Verschießen eines Behälters mit Hilfe eines Lasers **500** gezeigt. Durch die Einwirkung des ortsfest angebrachten Lasers auf den Kontaktbereich zwischen Deckel **40** und Behälterkörper **10** des Behälters entsteht eine gasundurchlässige Glasnaht, die eine sehr hohe mechanische Festigkeit aufweist. Durch Rotation des erfindungsgemäßen Behälters relativ zum Laserstrahl wird der Behälter rundum gasdicht versiegelt.

**[0063]** In **Fig. 7** ist ein dergestalt verschlossener Behälter **1** dargestellt, wobei der Behälterkörper **10** und der Deckel **40** durch die Fügenaht **45** umfänglich verbunden sind.

**[0064]** **Fig. 8a** und **Fig. 8b** zeigen Abbildungen einer so gefertigten Fügenaht, **Fig. 8a** in einer geringeren Vergrößerung und **Fig. 8b** in einer intensiveren Vergrößerung. Daraus ist ersichtlich, dass die Fügenaht sehr fein ist, und eine sehr geringe Stärke von etwa 50 µm aufweist. Dadurch entsteht durch das Verbinden des Deckels **40** und des Behälterkörpers **10** keine Schwachstelle, die die Eigenschaft des erfindungsgemäßen Behälters als gasdichte und langzeitstabile Diffusionsbarriere kompromittieren könnte.

**[0065]** In **Fig. 9** ist in der linken Abbildung ein Schnitt durch den Grenzbereich zwischen Deckel **40** und Mantel **20** eines erfindungsgemäßen Behälters dargestellt, die durch eine Fügenaht **45** versiegelt sind. Die Fügenaht hat eine Stärke  $d$ , die kleiner als 200 µm ist. Im Bereich dieser Fügenaht wird in der gezeigten Ausführungsform eine in der rechten Abbildung der **Fig. 9** dargestellte Lasergravur aufgebracht, welche eine Identifikation des Inhaltes, beispielsweise durch einen Strichcode erlaubt und auch andere Informationen enthalten kann. Diese im Bereich der Fügenaht **45** aufgebrachte Gravur wirkt ähnlich einer Versiegelung. Jedes nachträgliche Öffnen des Deckels oder jede Beschädigung der Fügenaht **45** kann anhand der Gravur optisch festgestellt werden.

**[0066]** **Fig. 10** zeigt verschiedene Möglichkeiten, erfindungsgemäße Behälter **1** in einem Endlager einzulagern. Das Endlager besteht aus einer Vielzahl an Stollen **250** in einem geeigneten Gestein **200**. Von den Stollen **250** laufen mehrere Bohrungen **210** ab, die zur Einlagerung des radioaktiven Abfalls bestimmt sind.

**[0067]** Wie in **Fig. 10a** dargestellt, können mehrere erfindungsgemäße Behälter **1** durch ein Gewebe **3** aus keramischen Fasern miteinander verbunden werden, und in eine Bohrung **210** eingelagert werden. Der verbleibende Freiraum zwischen den gebündelten Behältern **1** untereinander, und/oder zwischen den gebündelten Behältern **1** und den Wänden der Bohrung **210** wird anschließend mit einem geeigneten Material **220** verschüttet. Wenn die entsprechende Bohrung **210** gefüllt ist, wird auch der darüberliegende Stollen **250** mit dem Material **220** verschüttet.

**[0068]** In **Fig. 10b** ist eine weitere Möglichkeit der Endlagerung dargestellt, wobei mehrere erfindungsgemäße Behälter **1** in einem Container **4** aus mit Keramikfasern verstärktem Beton eingestellt werden. Diese Container **4** werden anschließend in einem Stollen **250** abgelegt. Wenn die Kapazität des Stollens **250** erschöpft ist, wird er mit einem entsprechend geeigneten Material **220** verschüttet.

**[0069]** Zusammenfassend ergibt sich, dass der erfindungsgemäße Behälter mehr als nur eine weitere Redundanz eines Vielbarrieren-Konzepts bei der

Endlagerung von radioaktiven Abfällen darstellt. Unter Verwendung eines an der Innenoberfläche mit einer zusätzlichen Materialschicht beschichteten Siliziumkarbidcontainers wird eine sehr wirkungsvolle Diffusionsbarriere errichtet, die eine stabile Langzeitlagerung von radioaktivem Material begünstigt.

ner die Einlagerung des verschlossenen Behälters in ein Wirtsgestein umfasst.

9. Verfahren nach einem der Ansprüche 4 bis 8, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Verfahren ferner das Verfüllen des eingelagerten Behälters aufweist.

### Patentansprüche

Es folgen 5 Seiten Zeichnungen

1. Keramischer Behälter (1) zur Endlagerung von radioaktivem Abfall (100), wobei der Behälter (1) Siliziumkarbid, vorzugsweise drucklos gesintertes Siliziumkarbid, aufweist oder daraus besteht, und an seiner Innenoberfläche eine zusätzliche Materialschicht (30) aufweist, **dadurch gekennzeichnet**, dass die zusätzliche Materialschicht an der Innenoberfläche Glaskohlenstoff umfasst oder daraus besteht.

2. Behälter nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass eine Wand des Behälters aus Siliziumkarbid eine Wandstärke zwischen 0,5 und 10 cm aufweist und/oder dass die Schichtdicke der als Diffusionsbarriere wirkenden zusätzlichen Materialschicht 1 µm bis 1 mm beträgt.

3. Behälter nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Behälter einen Innenbehälter darstellt und von außen zusätzlich von mindestens einem Behälter oder Mantel aus Metall und/oder keramischen Baustoffen umgeben wird.

4. Verfahren zur Endlagerung von radioaktivem Abfall, **dadurch gekennzeichnet**, dass der radioaktive Abfall in einen Behälter nach einem der vorhergehenden Ansprüche eingebracht wird, und der Behälter gasdicht verschlossen wird.

5. Verfahren nach Anspruch 4, **dadurch gekennzeichnet**, dass der gasdichte Verschluss durch Verbinden eines Grundkörpers und eines Deckels mittels Laser-Fügeverfahren erfolgt.

6. Verfahren nach Anspruch 4 oder 5, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Berührungsflächen eines Grundkörpers und eines Deckels des Behälters so gestaltet sind, dass der gasdichte Verschluss durch ein Aneinanderpressen des Deckels und des Grundkörpers durch äußeren Druck erfolgt, vorzugsweise durch äußeren Druck eines den Behälter umgebenden Füllmaterials.

7. Verfahren nach einem der Ansprüche 4 bis 6, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Berührungsfläche zwischen einem Grundkörper und einem Deckel des Behälters mit einer keramischen Masse abgedichtet wird.

8. Verfahren nach einem der Ansprüche 4 bis 7, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Verfahren fer-



Anhängende Zeichnungen

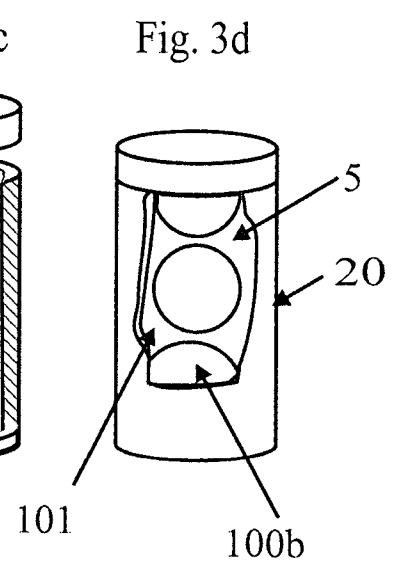
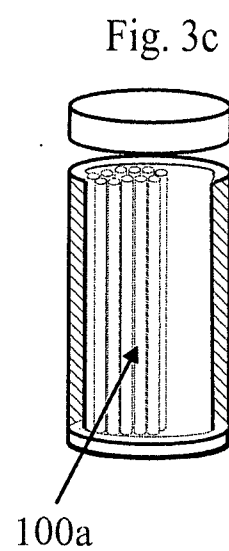
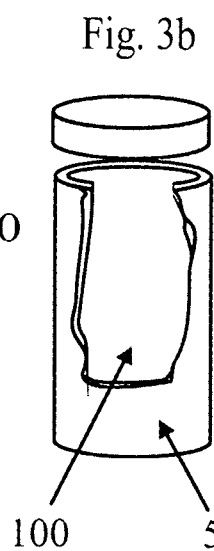
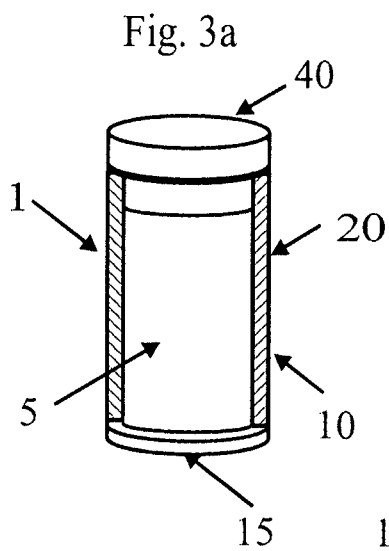
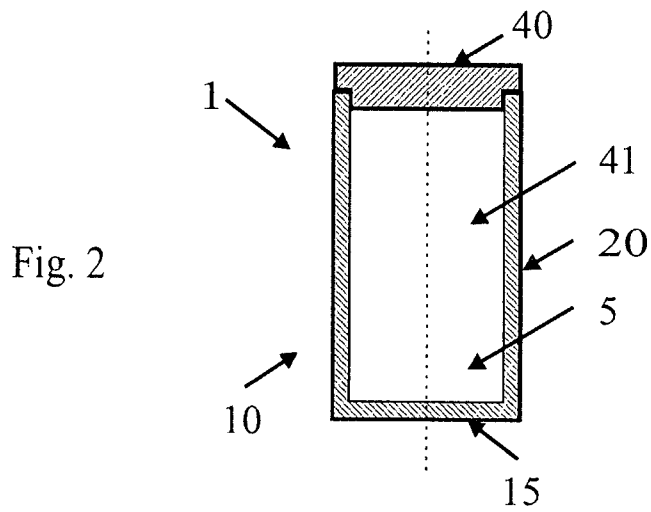
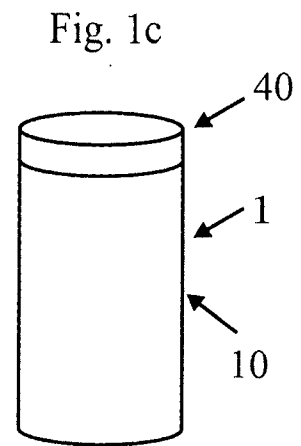
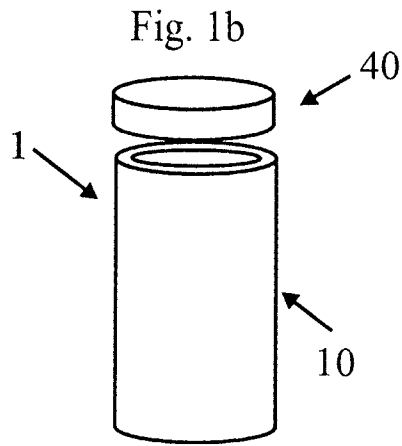
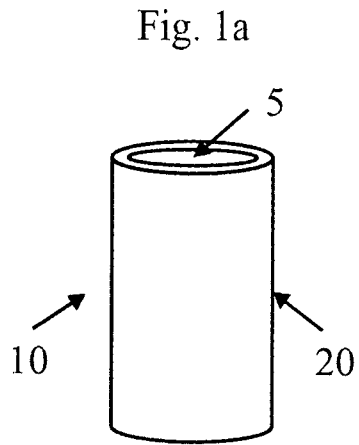


Fig. 4

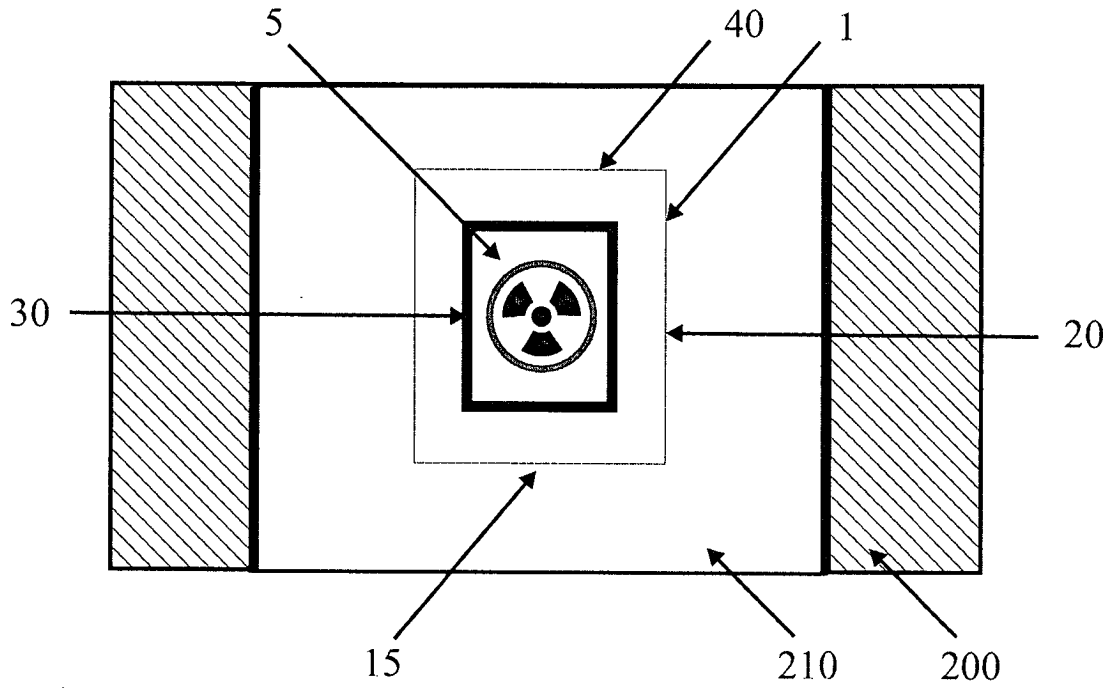
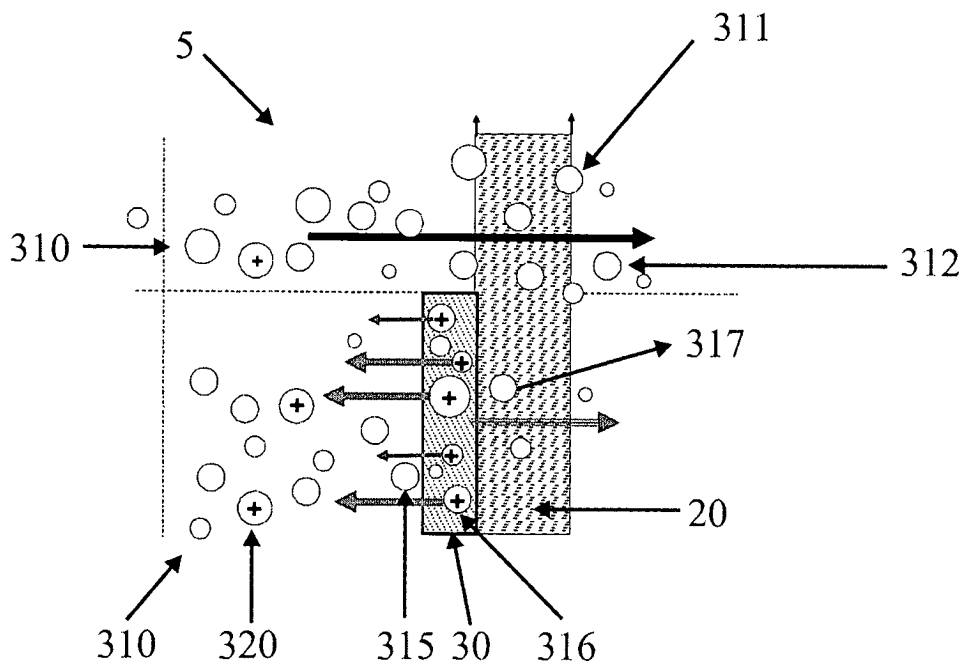


Fig. 5



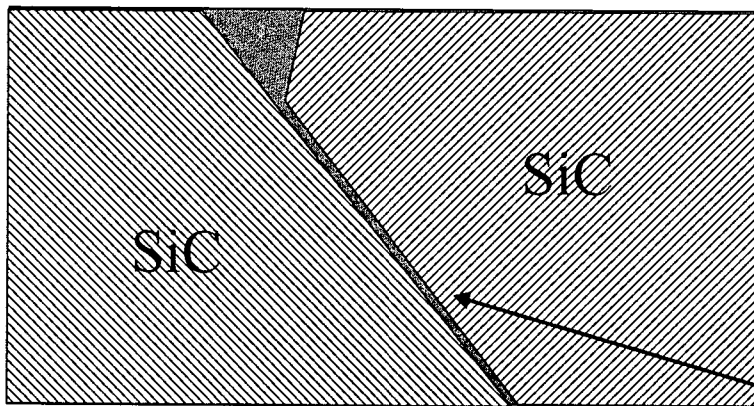
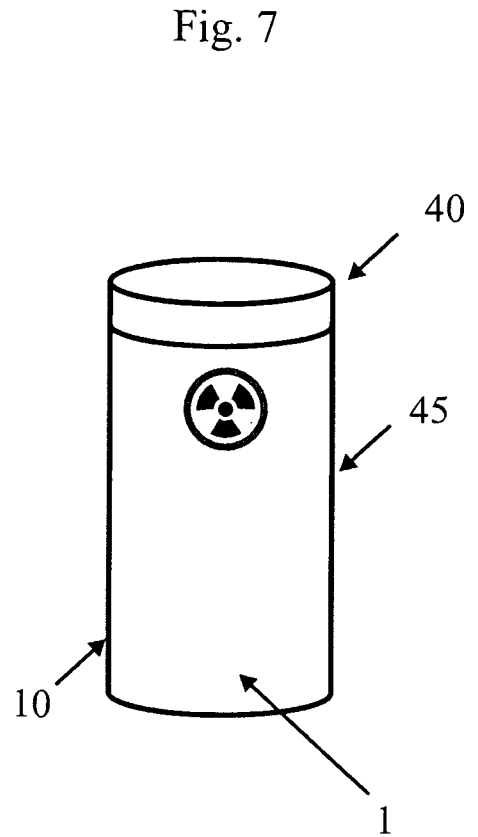
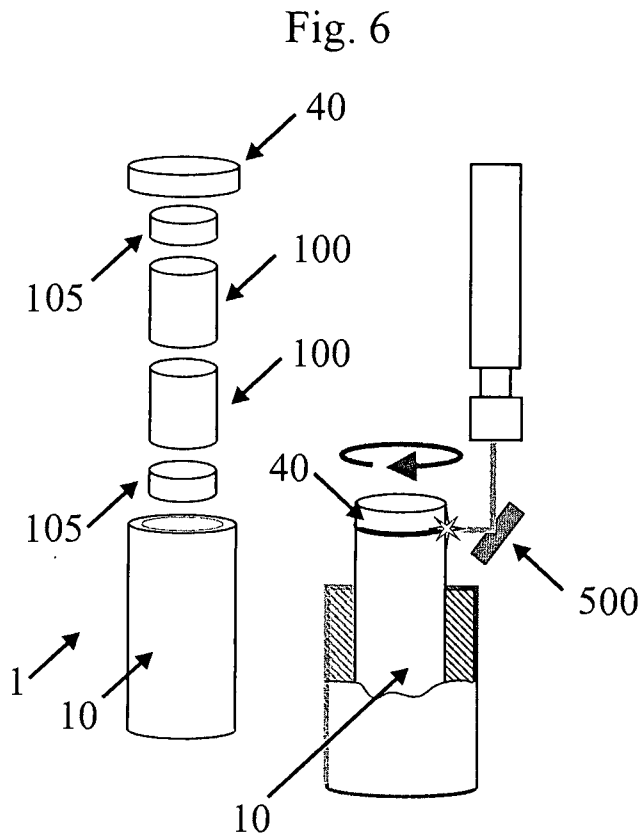


Fig. 8a

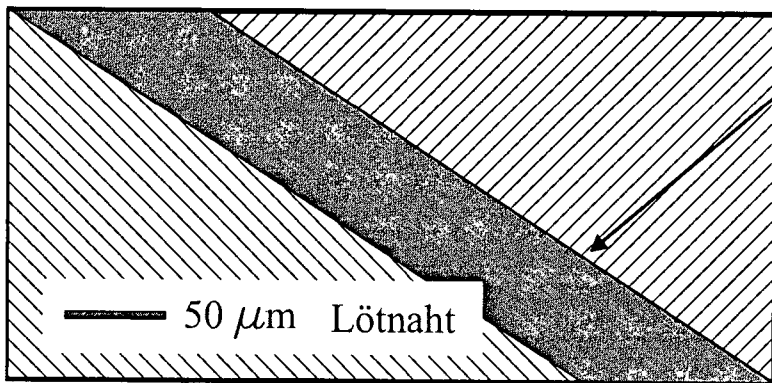


Fig. 8b

Fig. 9

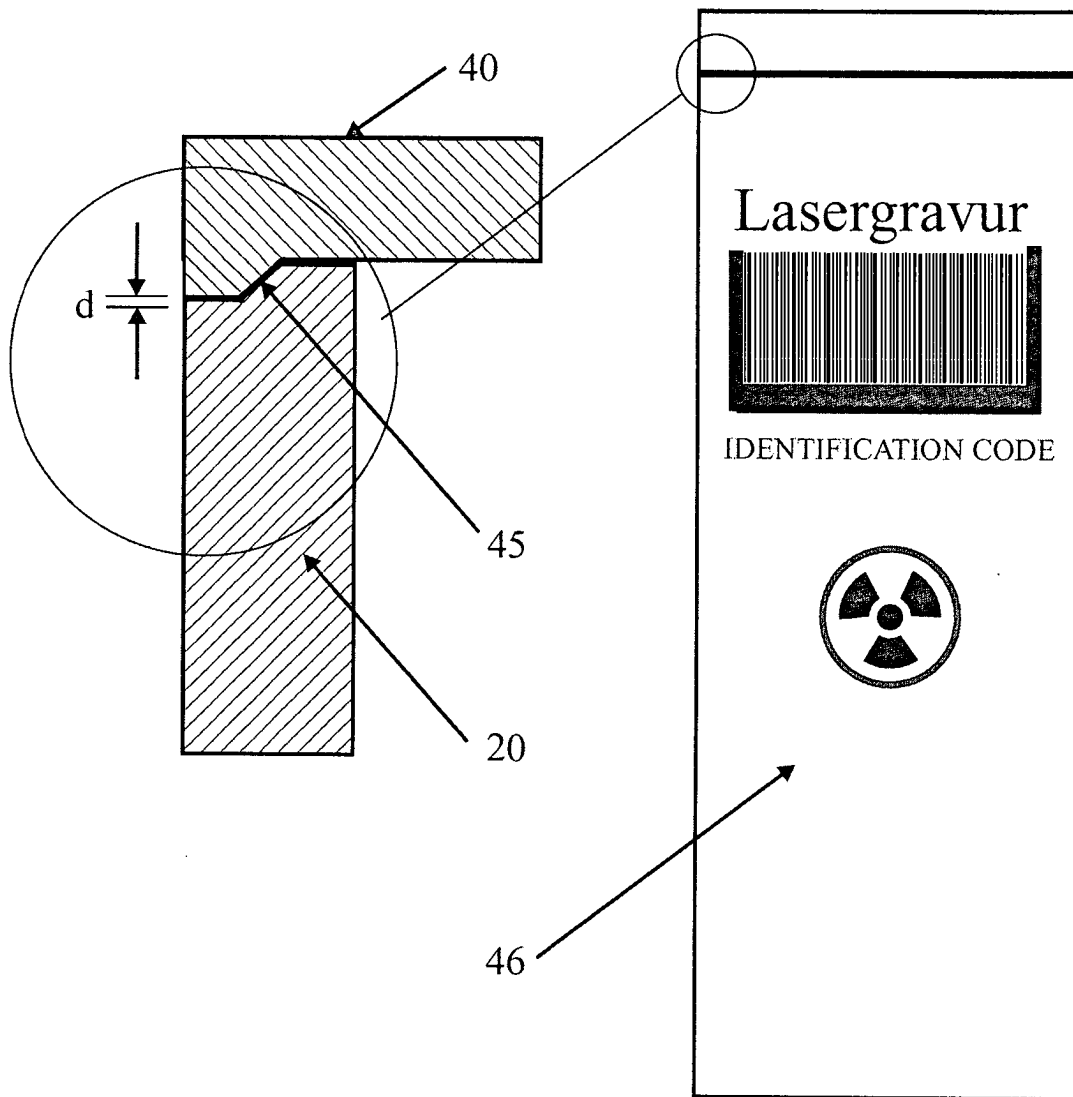


Fig. 10a

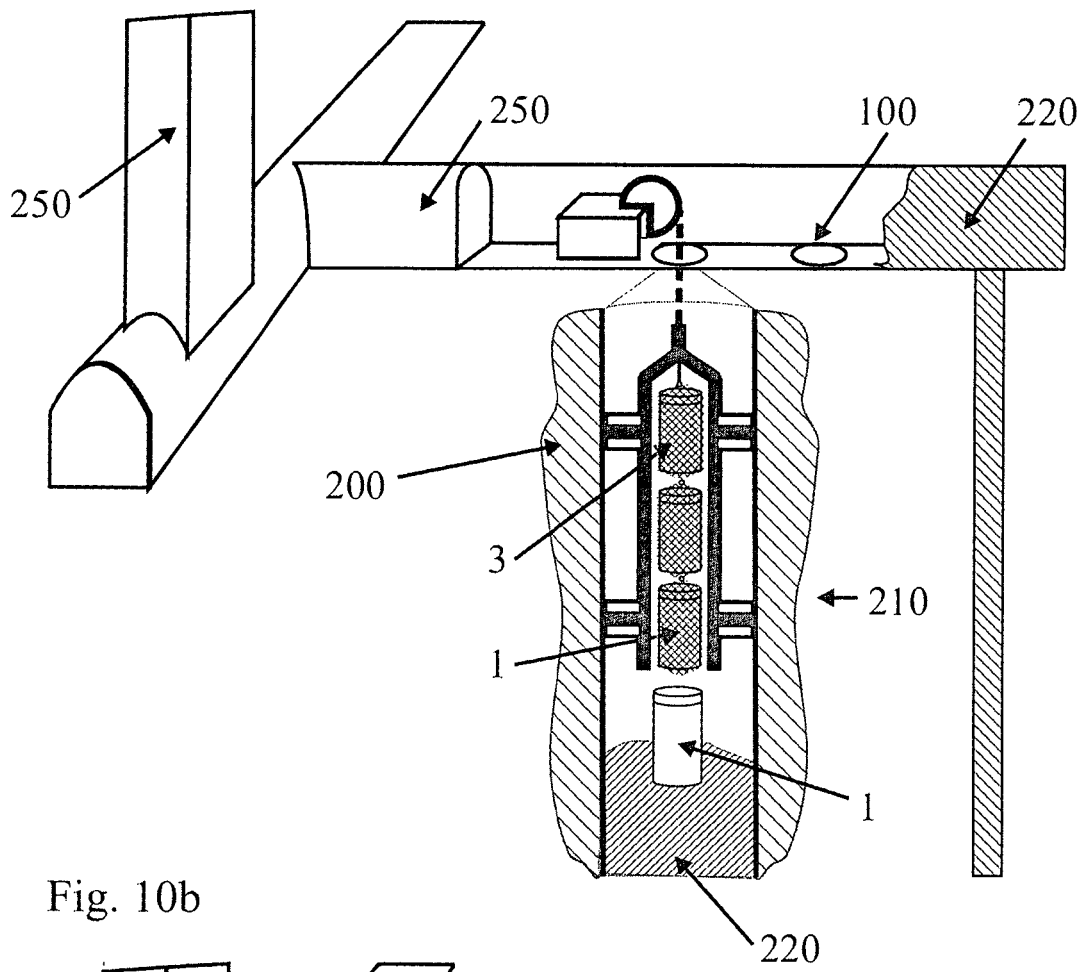


Fig. 10b

