



MINISTERO DELLO SVILUPPO ECONOMICO
DIREZIONE GENERALE PER LA TUTELA DELLA PROPRIETÀ INDUSTRIALE
UFFICIO ITALIANO BREVETTI E MARCHI

UIBM

DOMANDA NUMERO	101982900000825
Data Deposito	22/07/1982
Data Pubblicazione	22/01/1984

Priorità	286.403
Nazione Priorità	US
Data Deposito Priorità	23-JUL-81

Titolo

PREPARAZIONE DI COMBUSTIBILE NUCLEARE E RICICLO DI SFRIDI
--

DOCUMENTAZIONE RILEGATA

Descrizione dell'Invenzione Industriale dal titolo:

"PREPARAZIONE DI COMBUSTIBILE NUCLEARE E RICICLO DI

SFRIDI" di THE BABCOCK & WILCOX COMPANY, di naziona-

lità statunitense, a NEW ORLEANS, LA. (U.S.A.); depo-

sitata il 22 LUG. 1982

N° Prot.

RIASSUNTO

Un metodo migliorato per la preparazione di granuli di combustibile nucleare e per il riciclaggio di biossido di uranio utilizzando la radiazione di microonde, in cui forni a induzione a microonde sostituiscono forni convenzionali di sinterizzazione del tipo a refrattario e forni a scuotimento aria.

DESCRIZIONE

La presente invenzione si riferisce ad un metodo migliorato per la preparazione di granuli o palline di combustibile nucleare e per il riciclaggio di biossido di uranio facendo uso di radiazione a microonde in forni a induzione a microonde.

Il biossido di uranio (UO_2) è il combustibile più comunemente usato in reattori nucleari di oggi-giorno, dove l' UO_2 prende normalmente la forma di granuli sinterizzati che vengono caricati e sigillati all'interno di tubi di metallo snelli, cavi internamente, chiamati barre del combustibile. Una pluralità di tali barre del combustibile stabilisce un accu-

mulo di materiale assoggettabile a fissione in concentrazione sufficiente per sopportare sostenute reazioni di fissione all'interno dell'anima (o nucleo) di un reattore nucleare.

Un certo numero di tecniche sono state sviluppate per la produzione di granuli di combustibile nucleare, delle quali la più comune è la pressatura a freddo di UO_2 in polvere per formare granuli che vengono sinterizzati in idrogeno in un forno del tipo a refrattario a temperature di circa $1700^{\circ}C$ per un tempo variabile approssimativamente da tre a sei ore. Tipicamente, dopo la compressione (o pressatura), i granuli formati vengono posti in contenitori da trasporto altamente resistenti al calore chiamati "navicelle" o "navette" di trasporto che vengono spinti o fatti passare attraverso un forno di sinterizzazione riscaldato con resistenze elettriche con rivestimento di blocchi altamente refrattari e nel quale i granuli vengono sinterizzati per formare prodotti finali densi, stabili. Tale processo richiede però un forno speciale riscaldato elettricamente, che è costoso nell'esercizio e nella manutenzione, e il campo di temperature di tali forni, del tipo "a spingitoio" e "a bilanciere" cioè a spostamento, sembra essere al limite o vicino al limite della tecno-

logia commerciale. Inoltre tali forni non si sono dimostrati adattabili al funzionamento comandato da lontano necessario per ritrattare e rifabbricare, cioè rigenerare combustibili nucleari.

Durante il processo di preparazione di granuli di combustibile nucleare viene generata una quantità di granuli di UO_2 sinterizzati scarto e di polvere di UO_2 di sfrido o di avanzo disponibile per essere riciclata. Un metodo tipico dell'arte antecedente relativo al recupero di UO_2 per il riciclaggio è quello di riscaldare il materiale in aria di modo che l' UO_2 si trasforma in U_3O_8 , e nella forma di U_3O_8 il materiale è disponibile per la rimessa in ciclo e per essere mescolato di nuovo con UO_2 pulite e polveri leganti organiche nella fase iniziale del processo di preparazione dei granuli di combustibile nucleare. L' U_3O_8 presenta una struttura cristallina differente dall' UO_2 , e quando esso viene formato dall' UO_2 , la differenza strutturale fa sì che la struttura iniziale si scheggi e si frammenti. La conversione da UO_2 in U_3O_8 per la rimessa in ciclo nell'arte precedente viene comunemente effettuata in un forno convenzionale ad aria, e una volta che il materiale è riscaldato, esso viene scosso per aiutare la fratturazione (o frantumazione).

Gli scopi della presente invenzione sono quelli di sostituire il forno di sinterizzazione del tipo a refrattario riscaldato con resistenze, usato nel processo di preparazione di granuli di combustibile nucleare, e la combinazione del forno a scuotimento-aria, usato nel processo di conversione-rinvasa in ciclo dell' UO_2 in U_3O_8 , con dei forni ad induzione a microonde. Fino ad ora, l'induzione a microonde è stata usata come meccanismo di riscaldamento quasi interamente tramite la suscettibilità o sensibilità della molecola dell'acqua alla radiazione delle microonde, cioè l'uso delle microonde per il riscaldamento di materiali è stato concentrato sugli effetti che le microonde hanno sulle molecole dell'acqua. Le microonde causano dei cambiamenti rapidi nella polarizzazione della molecola dell'acqua e con ciò generano calore. L'invenzione della presente descrizione rende noto che l'ossido di uranio con le stechiometrie UO_2 a U_3O_8 e che i granuli (o palline) di UO_2 sinterizzati e la polvere di UO_2 di sfrido o avanzo sono direttamente suscettibili cioè sensibili alla radiazione a microonde. In conseguenza il forno di sinterizzazione del tipo a refrattario e il forno ad aria trattati sopra possono essere sostituiti da forni molto più piccoli a induzione a microonde.

La presente invenzione ovvia a molte delle manchevolezze nel trattamento dei combustibili secondo l'arte precedente in forni di sinterizzazione del tipo a refrattario, con una riduzione dei tempi di sinterizzazione e permettendo di raggiungere le temperature in tempo più breve, dando luogo a temperature più elevate disponibili, diminuendo il consumo di energia e le necessità di spazio, riducendo l'usura nei forni refrattari o eliminando il fabbisogno di materiali per detti forni, offrendo una pronta adattabilità al funzionamento modularizzato in dislocazioni lontane dove la perdita di un modulo o il danno ad un modulo non significherebbe l'arresto (cioè lo spegnimento) dell'intero impianto, e dando luogo a migliorate caratteristiche di densificazione e di porosità del prodotto sinterizzato. Inoltre l'invenzione ovvia a molte delle deficienze della rimessa in ciclo associate con la combinazione del forno a scuotimento-aria riducendo i tempi di riscaldamento per portare l' UO_2 alla sua temperatura di ossidazione, permettendo la frattura o frantumazione statica di granuli sinterizzati di UO_2 e producendo con un miglior rendimento una polvere di U_3O_8 per la rimiscelazione.

La presente invenzione si riferisce ad un metodo migliorato per la preparazione di granuli o palli

ne di combustibile nucleare e la rimessa in ciclo di biossido di uranio utilizzando il concetto della radiazione a microonde in un forno di induzione a microonde. Tipicamente, durante il processo di preparazione dei granuli, il biossido di uranio e le polveri leganti organiche vengono mescolati e poi formati e pressati per formare compresse pressate di granuli. Le compresse pressate vengono poi riscaldate, sinterizzate e mantenute alla temperatura di sinterizzazione in un forno a induzione a microonde in un'atmosfera riducente, dopo di che le compresse sinterizzate vengono raffreddate alla temperatura ambiente sotto condizioni atmosferiche continuamente riducenti. Dopo il raffreddamento le compresse vengono frantumate per formare il prodotto desiderato finito di granuli di biossido di uranio. Una quantità di polvere di biossido di uranio di sfrido o avanzo e di granuli di biossido di uranio sinterizzati di scarto generatasi durante la preparazione di granuli è disponibile per essere riciclata in un forno a induzione a microonde dove il materiale viene riscaldato in un'atmosfera ossidante. Nel forno, il biossido di uranio rimesso in ciclo viene ossidato per formare una polvere di U_3O_8 e poi trasportato per essere mescolato con biossido di uranio e poi-

veri leganti organiche nella fase iniziale del processo di preparazione di granuli di combustibile nucleare.

Le varie caratteristiche di novità che caratterizzano l'invenzione sono evidenziate dettagliatamente nelle rivendicazioni allegare alla presente descrizione e che formano parte integrante di essa. Per una migliore comprensione dell'invenzione, dei suoi vantaggi nella conduzione del processo e dei risultati specifici ottenuti nel suo uso, viene fatto riferimento al materiale descrittivo allegato nel quale è illustrata e descritta una tipica realizzazione dell'invenzione.

I granuli di combustibile nucleare realizzati per alimentare reattori nucleari vengono prodotti partendo da una polvere di biossido di uranio (UO_2) (l'industria ha adottato UO_2 anche se la polvere stechiometrica di partenza può essere rappresentata come $UO_{2,05-2,15}$) e mescolandola con una polvere legante organica disponibile in commercio. La quantità del legante organico non è critica ma dovrebbe essere nell'ambito di circa lo 0,1 allo 0,3% del peso della miscela ottenuta - il resto essendo circa dal 99,7 al 99,9% di UO_2 - cioè una quantità sufficiente di legante per tenere insieme le polveri durante la

formatura e la pressatura. Il tempo di miscelazione dovrebbe essere sufficiente per produrre una miscela omogenea. Dopo la miscelazione, la miscela mescolata viene formata e pressata a freddo per formare compresse di granuli pressate verdi, la forza di pressatura essendo quella sufficiente per compatte cioè addensare le polveri all'incirca del 50% della densità teorica della miscela, tale determinazione essendo basata sulla lunghezza, il diametro ed il peso della compressa. Le compresse vengono poi riscaldate e sinterizzate in un forno a induzione a microonde in un'atmosfera riducente che consiste essenzialmente di una miscela di gas di azoto (N_2) e idrogeno (H_2) e, più precisamente, di una miscela di gas di circa il 75% di H_2 ed il 25% di N_2 . Comunque una qualsiasi atmosfera riducente sarebbe idonea. La temperatura di sinterizzazione è nell'ambito da circa 1600° C a 1800°C, e le compresse vengono tenute nel forno a microonde in atmosfera riducente alla temperatura di sinterizzazione per approssimativamente 2 a 6 ore per ottenere una densità della compressa di circa il 95% della densità teorica. La sinterizzazione in un'atmosfera riducente riduce la polvere iperstechiometrica di partenza, $UC_{2,05-2,15}$ a UC_2 . Dopo la sinterizzazione,

le compresse vengono raffreddate approssimativamente a temperatura ambiente, il raffreddamento venendo condotto in atmosfera riducente. Dopo il raffreddamento le compresse vengono frantumate per dar luogo al prodotto finito desiderato di UO_2 in granuli.

Il sopradescritto processo di fabbricazione di granuli nucleari può anche essere condotto con fasi di processo aggiuntive, introdotte dopo la fase di formatura e di compressione ma prima della fase di sinterizzazione. Tuttavia con fasi addizionali, la forza di pressatura sopra menzionata diventa quella che è sufficiente per compattare le polveri a circa il 44% della loro densità di miscelazione teorica. Le fasi addizionali includono il far passare a forza le compresse attraverso degli schermi o setacci per formare un granulato e poi la pressatura a freddo del granulato in compresse di granuli pressati, la forza di pressatura del granulato essendo quella sufficiente per compattare il granulato ed approssimativamente il 50% della densità teorica. Per di più della polvere di U_3O_8 può essere mescolata con la polvere di UO_2 e con le polveri leganti organiche nella prima fase del processo di preparazione del combustibile, la polvere di U_3O_8 rappresentando approssimativamente il 5% in peso della miscela mescolata,

la rimanenza essendo costituita da circa lo 0,1 al 0,3% di legante e circa il 94,7 al 94,9% di UO_2 . L' U_3O_8 contenuto nelle compresse di granuli, a seguito della sinterizzazione nell'atmosfera riducente, viene convertito in UO_2 .

E' stato determinato che l'ossido di uranio con stechiometrie UO_2 a U_3O_8 è direttamente suscettibile alla radiazione di microonde ad approssimativamente 2450 MHz cioè la frequenza di un forno standard a microonde da cucina che riscalda rapidamente a temperature molto elevate al calor rosso. Dovrebbe essere tenuto presente che, mentre un forno convenzionale a microonde è scelto per l'uso perché prontamente disponibile, altri forni a induzione a microonde, convenzionali e non convenzionali, che funzionano a frequenze diverse, sarebbero anche essi idonei. Altri materiali ceramici comprendenti allumina, silice, niobio, litio e grafite non sono così prontamente suscettibili alla radiazione di microonde a 2450 MHz.

Vengono effettuate delle prove per accertare che l'ossido di uranio con stechiometrie UO_2 a U_3O_8 è direttamente suscettibile alla radiazione di microonde disponendo delle compresse di granuli di UO_2 verdi pressati in un tubo di allumina, mettendo il

tubo in un forno convenzionale a microonde a 2450 MHz , prevedendo un mezzo per l'introduzione di un'atmosfera riducente nel tubo, tappando le estremità del tubo con materiale isolante refrattario e riscaldando il tubo, con le compresse, nel forno in un'atmosfera riducente costituita da una miscela di gas H_2 e CO . Il riscaldamento venne inizialmente effettuato per due minuti ad un'impostazione della potenza di 20, ciò che significa che il 100% della potenza del forno veniva erogata per il 20% del tempo di riscaldamento. La potenza iniziale di 20, sufficiente per a sportare la maggior parte di qualsiasi umidità contenuta, venne aumentata ad un'impostazione della potenza di 30 e mantenuta per cinque minuti per asportare qualsiasi umidità rimasta. Poi la potenza venne aumentata ad un'impostazione di 70 per dieci minuti e quindi aumentata ad un'impostazione di 100 per ulteriori quindici minuti. Il tubo di allumina stesso era trasparente alla radiazione di microonde permettendo il passaggio della radiazione delle microonde e il riscaldamento delle compresse dall'interno verso l'esterno piuttosto che dall'esterno verso l'interno, essendo questa una caratteristica di normali forni a refrattario. Il riscaldamento a $1370^{\circ}C$ venne ottenuto dopo solo quindici minuti di esercizio. Un

bagliore tremolante dall'interno del tubo iniziò circa 5 minuti dopo l'impostazione della potenza a 70, tale bagliore diventando costante all'impostazione dell'intera potenza di 100, ed una temperatura di sinterizzazione di 1620°C venne misurata alla superficie esterna del tubo. L'impostazione della potenza di 100 venne mantenuta per altri 15 minuti e poi le compresse vennero raffreddate nel forno ^{circa} alla temperatura ambiente, l'atmosfera riducente venendo continuamente mantenuta. Furono effettuate misurazioni delle densità delle compresse che vengono presentate come segue:

Compressa	Diametro	Lunghezza	Peso	Densità	Densità teorica
($\varnothing$)	(cm)	(cm)	(g)	(g/cc)	(%)
1 non sinterizzata (controllo)	0,70	1,04	2,24	5,59	51,00
2 sinterizzata	0,59	0,85	2,12	9,12	83,21
3 sinterizzata	0,58	0,73	1,72	8,91	81,30
4 sinterizzata	0,59	0,87	2,01	8,45	77,10

Ulteriori prove vennero effettuate su delle compresse di granuli UO_2 della misura più comunemente usata nella preparazione di granuli di combustibile nucleare. Le prove vennero effettuate come descritto sopra all'eccezione che il tempo di sinterizzazione

venne aumentato a 4 ore e le compresse presentavano un diametro interno di circa 0,3 cm. Vengono effettuate delle misurazioni della densità delle compresse che vengono presentate come segue:

Compresa	Diametro esterno	Lunghezza	Peso	Densità	Densità teorica
(#)	(cm)	(cm)	(g)	(g/cc)	(%)
1	0,97	1,03	7,12	10,14	92,54
2	0,97	1,11	7,87	10,52	96,02
3	0,98	1,11	7,83	10,43	95,14
4	0,98	1,04	7,02	9,93	90,37
5	0,97	1,04	7,01	10,07	91,92
6	0,98	1,08	7,66	10,41	94,98
7	0,98	1,10	7,76	10,43	95,19
8	0,97	1,17	7,79	9,92	90,48
9	0,98	1,14	7,71	9,86	89,95
10	0,97	1,11	7,61	10,41	95,01

Fu scelta l'allumina per l'uso nella camera di sinterizzazione perchè essa era in grado di resistere alle elevate temperature generate ma non interagiva con il campo delle microonde. Di conseguenza non potevano essere presi in considerazione componenti metallici perchè essi riflettono le microonde. Durante il processo di preparazione del combustibile nucleare, non occorre che le compresse siano sigillate

in tubi di allumina, ma "navicelle" di allumina, contenitori e altro materiale invisibile alla radiazione delle microonde potrebbero essere usati quale mezzo di trasporto per le compresse nel forno a induzione a microonde. Le compresse di prova di biossido di uranio con legante organico e di biossido di uranio e U_3O_8 con legante organico risultarono tutte suscettibili alla radiazione delle microonde dimostrando con ciò che il forno di sinterizzazione a induzione a microonde è una valida alternativa al forno di sinterizzazione del tipo a refrattario.

La rimessa in ciclo cioè il riciclaggio di biossido di uranio di sfrido e avanzo è un'aggiunta importante al processo della preparazione del combustibile nucleare. Durante la preparazione dei granuli viene generata una quantità di granuli di biossido di uranio sinterizzato e di polvere di biossido di uranio disponibile per la rimessa in ciclo. Granuli sinterizzati che non corrispondono alle specifiche e polvere di biossido di uranio o detrito di frantumazione generato durante la fase di frantumazione e frammentazione delle compresse vengono trasportati in una navicella o in un recipiente di allumina o di altro simile materiale invisibile (cioè non suscettibile) alla radiazione di microonde, in

un forno a induzione a microonde per il ritrattamento ed il riciclo. Inoltre, qualsiasi altro biossido di uranio di sfrido o di avanzo potrebbe essere aggiunto e trattato in questo modo. Il riscaldamento del materiale alla sua temperatura di ossidazione di almeno 200°C nel forno a microonde viene effettuato mediante la radiazione a microonde in un'atmosfera ossidante, generalmente, ma non esclusivamente in aria, nella quale l' UO_2 viene ossidato per formare una polvere di U_3O_8 . Il tempo e la temperatura di riscaldamento specifici non sono critici ma il riscaldamento dovrebbe essere effettuato per un periodo sufficiente per cambiare il materiale in una fine polvere nera, un processo che è una funzione della massa di materiale ma che viene generalmente completato in un campo di temperature comprese approssimativamente fra 400 e 500°C in circa 20 a 40 minuti. Nel forno i granuli vengono riscaldati al punto in cui la superficie esterna del granulo si ossida in U_3O_8 e si separa dal granulo interno di UO_2 a causa delle differenze nella densità fra UO_2 e U_3O_8 , l' UO_2 presentando una maggiore densità. Con l'introduzione di superfici fresche, non ossidate, il processo può continuare fino a quando l'intero granulo è ossidato riducendosi in una polvere nera

di U_3O_8 . La polvere di biossido di uranio e il detrito di frantumazione si trovano già in forma di polvere, perciò a seguito del riscaldamento nel forno in atmosfera ossidante il detrito suole venire velocemente trasformato nella polvere di U_3O_8 . Il prodotto ossidato che esce dal forno è una fine polvere di U_3O_8 adatta, dopo il raffreddamento, per essere mescolata di nuovo con polveri di biossido di uranio e di legante organico in un processo di preparazione dei granuli di combustibile nucleare.

Il riscaldamento nel forno di riciclaggio può essere continuo e intermittente. L'ossidazione dei granuli viene però favorita dal riscaldamento a microonde quando il livello della potenza di alimentazione viene alternato, cioè è intermittente una fase di potenza inserita essendo seguita da una fase di interruzione della potenza. Dopo un periodo di potenza inserita seguita da un periodo di interruzione di potenza i granuli di UO_2 si riscaldano in modo estremamente rapido quando la radiazione delle microonde viene ristabilita. Granuli sinterizzati sono stati frantumati completamente semplicemente disinserendo la fonte delle microonde e reinserendola durante l'ossidazione dei granuli. Quando il materiale di UO_2 ha oltrepassato la temperatura di ossidazione

la sua suscettibilità alla radiazione delle microonde è molto elevata. Quando la radiazione delle microonde viene interrotta il materiale comincia a raffreddarsi sempre ancora ossidandosi. Il materiale ritorna immediatamente ad una temperatura corrispondente ad un bagliore rosso quando la radiazione delle microonde viene reintrodotta. Il rapido riscaldamento e raffreddamento fa sì che sollecitazioni termiche tremende si verifichino nella struttura dei granuli. Le sollecitazioni termiche, insieme con le sollecitazioni introdotte a causa della differenza della densità fra UO_2 e U_3O_8 causano la frantumazione o frattura dei granuli in una condizione statica. Superfici nuove cioè fresche vengono esposte in occasione di ogni ciclo di raffreddamento permettendo che l'ossidazione continui fino ad essere completa.

Le prove di laboratorio hanno dimostrato che campioni di polvere di UO_2 posti in un forno a microonde convenzionale di 2450 MHz sono direttamente suscettibili alla radiazione delle microonde in un'atmosfera ossidante. Un campione di polvere di UO_2 con un peso di circa 5 grammi raggiungerà il bagliore rosso in meno di un minuto e l'ossidazione si verificherà su tutte le superfici a contatto con aria. Le prove hanno anche dimostrato che un granulo sinterizza-

to posto nel campo delle microonde ne percepisce l'effetto nel giro di circa 1 a 2 minuti, il granulo frantumandosi via via che l'ossidazione progredisce. L'ossidazione del granulo viene favorita impostando il livello della potenza a 50. Il granulo si frantuma a causa delle differenze di densità e delle sollecitazioni termiche indotte quando le microonde vengono inserite e poi disinserite. Una impostazione ridotta della potenza, che forniva una radiazione delle microonde inserita/disinserita, cioè intermittente intensificava l'ossidazione per la creazione di sollecitazioni termiche e di differenze di densità causando la frattura del granulo e aumentando le superfici fresche di UO_2 disponibili per l'ossidazione.

Sebbene in conformità alle disposizioni di legge si sia qui illustrata e descritta una forma di realizzazione specifica dell'invenzione, gli esperti in materia comprenderanno che potranno essere fatti cambiamenti nella forma dell'invenzione coperta dalle rivendicazioni e che certe caratteristiche dell'invenzione possono qualche volta essere usate vantaggiosamente senza il corrispondente uso delle altre caratteristiche.

RIVENDICAZIONI

1) Un metodo per preparare granuli o palline di

combustibile nucleare comprendente le fasi di:

- a) mescolazione di una predeterminata quantità di biossido di uranio e di polveri leganti organiche;
- b) formazione e compressione della miscela mescolata per dar luogo a compresse di granuli pressati;
- c) riscaldamento e sinterizzazione delle compresse in un forno a induzione a microonde in un'atmosfera riducente;
- c) mantenimento delle compresse alla temperatura di sinterizzazione nell'atmosfera riducente per un tempo predeterminato;
- e) raffreddamento delle compresse approssimativamente alla temperatura ambiente mentre viene mantenuta l'atmosfera riducente; e
- f) frammentazione delle compresse per ottenere il prodotto desiderato finito in granuli.

2) Il metodo secondo la rivendicazione 1, in cui la compressione è sufficiente per ottenere una densità teorica della compressa di circa il 30%.

3) Il metodo secondo la rivendicazione 1, in cui la compressione è sufficiente per ottenere una densità teorica della compressa di circa il 44%.

4) Il metodo secondo la rivendicazione 1 comprendente inoltre fra le fasi (b) e (c) le fasi di:
far passare a forza le compresse attraverso

schermi e setacci per formare un granulato; e comprimere il granulato per formare compresse di granuli pressati.

5) Il metodo secondo la rivendicazione 4, in cui la compressione è sufficiente per ottenere una densità teorica della compressa di circa il 50%.

6) Il metodo secondo la rivendicazione 1, in cui le compresse vengono sinterizzate in detto forno a induzione a microonde ad una temperatura nell'ambito da circa 1600°C a circa 1800°C.

7) Il metodo secondo la rivendicazione 1, in cui detta atmosfera riducente comprende una miscela di gas N_2 e H_2 .

8) Il metodo secondo la rivendicazione 7, in cui detta miscela di gas è di circa il 75% di H_2 e il 25% di N_2 .

9) Il metodo secondo la rivendicazione 1, in cui detta quantità di biossido di uranio e di polveri leganti organiche della fase a) è di circa dal 99,7 al 99,9% e dallo 0,1 allo 0,3% del peso rispettivamente.

10) Il metodo secondo la rivendicazione 1, in cui il tempo di permanenza della fase d) è circa di 2 a 6 ore.

11) Il metodo secondo la rivendicazione 1, che

comprende inoltre la fase di aggiungere una quantità predeterminata di polvere di U_3O_8 per la miscelazione con detti biossido di uranio e polveri leganti organiche della fase a).

12) Un metodo secondo la rivendicazione 11, in cui la quantità della polvere di U_3O_8 è di circa il 5% del peso della miscela in polvere mescolata.

13) Un metodo per riciclare granuli di biossido di uranio sinterizzati^{di} scarto e polvere di biossido di uranio di sfrido e di avanzo generati durante la preparazione di granuli di combustibile nucleare comprendente le fasi di:

- trasportare i granuli di biossido di uranio sinterizzati, la polvere di biossido di uranio di sfrido e la combinazione di esse in un forno a induzione a microonde;
- riscaldare il materiale trasportato nel forno a induzione a microonde in un'atmosfera ossidante per ossidare il biossido di uranio fino a divenire polvere di U_3O_8 ; e
- trasferire la polvere di U_3O_8 per la miscelazione con biossido di uranio e polveri leganti organiche in un processo di preparazione di granuli di combustibile nucleare.

14) Il metodo secondo la rivendicazione 13, in

cui il riscaldamento nel forno a induzione a micro-
onde è continuo.

15) Il metodo secondo la rivendicazione 13, in
cui il riscaldamento nel forno a induzione a micro-
onde è intermittente.

FIRENZE 21 LUG. 1982

UFFICIO TECNICO ING. A. MANNUGGI

[Signature]
PER INCARICO



L'UFFICIALE ROGANTE
[Signature]

"PREPARAZIONE DI COMBUSTIBILE NUCLEARE E RICICLO DI
SFRIDI".

Base dell'Invenzione.

La presente invenzione si riferisce ad un metodo migliorato per la preparazione di granuli o palline di combustibile nucleare e per il riciclaggio di biossido di uranio facendo uso di radiazione a microonde in forni a induzione a microonde.

Il biossido di uranio (UO_2) è il combustibile più comunemente usato in reattori nucleari di oggi, dove l' UO_2 prende normalmente la forma di granuli sinterizzati che vengono caricati e sigillati all'interno di tubi di metallo snelli, cavi internamente, chiamati barre del combustibile. Una pluralità di tali barre del combustibile stabilisce un accu-

mulo di materiale assoggettabile a fissione in concentrazione sufficiente per sopportare sostenute reazioni di fissione all'interno dell'anima (o nucleo) di un reattore nucleare.

Un certo numero di tecniche sono state sviluppate per la produzione di granuli di combustibile nucleare, delle quali la più comune è la pressatura a freddo di UO_2 in polvere per formare granuli che vengono sinterizzati in idrogeno in un forno del tipo a refrattario a temperature di circa $1700^{\circ}C$ per un tempo variabile approssimativamente da tre a sei ore. Tipicamente, dopo la compressione (o pressatura), i granuli formati vengono posti in contenitori da trasporto altamente resistenti al calore chiamati "navicelle" o "navette" di trasporto che vengono spinti o fatti passare attraverso un forno di sinterizzazione riscaldato con resistenze elettriche con rivestimento di blocchi altamente refrattari e nel quale i granuli vengono sinterizzati per formare prodotti finali densi, stabili. Tale processo richiede però un forno speciale riscaldato elettricamente, che è costoso nell'esercizio e nella manutenzione, e il campo di temperature di tali forni, del tipo "a spingitoio" e "a bilanciere" cioè a spostamento, sembra essere al limite o vicino al limite della tecno-

legia commerciale. Inoltre tali forni non si sono dimostrati adattabili al funzionamento comandato da lontano necessario per ritrattare e rifabbricare, cioè rigenerare combustibili nucleari.

Durante il processo di preparazione di granuli di combustibile nucleare viene generata una quantità di granuli di UO_2 sinterizzati ^{di} scarto e di polvere di UO_2 di sfrido o di avanzo disponibile per essere riciclata. Un metodo tipico dell'arte antecedente relativo al recupero di UO_2 per il riciclaggio è quello di riscaldare il materiale in aria di modo che l' UO_2 si trasforma in U_3O_8 , e nella forma di U_3O_8 il materiale è disponibile per la rimessa in ciclo o per essere mescolato di nuovo con UO_2 polite e polveri leganti organiche nella fase iniziale del processo di preparazione dei granuli di combustibile nucleare. L' U_3O_8 presenta una struttura cristallina differente dall' UO_2 , e quando esso viene formato dall' UO_2 , la differenza strutturale fa sì che la struttura iniziale si scheggi e si frammenti. La conversione da UO_2 in U_3O_8 per la rimessa in ciclo nell'arte precedente viene comunemente effettuata in un forno convenzionale ad aria, e una volta che il materiale è riscaldato, esso viene scosso per aiutare la fratturazione (o frantumazione).

Gli scopi della presente invenzione sono quelli di sostituire il forno di sinterizzazione del tipo a refrattario riscaldato con resistenze, usato nel processo di preparazione di granuli di combustibile nucleare, e la combinazione del forno a siccamento-aria, usato nel processo di conversione-rinvasa in ciclo dell' UO_2 in U_3O_8 , con dei forni ad induzione a microonde. Fino ad ora, l'induzione a microonde è stata usata come meccanismo di riscaldamento quasi interamente tramite la suscettibilità o sensibilità della molecola dell'acqua alla radiazione delle microonde, cioè l'uso delle microonde per il riscaldamento di materiali è stato concentrato sugli effetti che le microonde hanno sulle molecole dell'acqua. Le microonde causano dei cambiamenti rapidi nella polarizzazione della molecola dell'acqua e con ciò generano calore. L'invenzione della presente descrizione rende noto che l'ossido di uranio con le stechiometrie UO_2 a U_3O_8 e che i granuli (o palline) di UO_2 sinterizzati e la polvere di UO_2 di sfrido o avanzo sono direttamente suscettibili cioè sensibili alla radiazione a microonde. In conseguenza il forno di sinterizzazione del tipo a refrattario e il forno ad aria trattati sopra possono essere sostituiti da forni molto più piccoli a induzione a microonde.

La presente invenzione ovvia a molte delle manchevolezze nel trattamento dei combustibili secondo l'arte precedente in forni di sinterizzazione del tipo a refrattario, con una riduzione dei tempi di sinterizzazione e permettendo di raggiungere le temperature in tempo più breve, dando luogo a temperature più elevate disponibili, diminuendo il consumo di energia e le necessità di spazio, riducendo l'usura nei forni refrattari o eliminando il fabbisogno di materiali per detti forni, offrendo una pronta adattabilità al funzionamento modularizzato in dislocazioni lontane dove la perdita di un modulo o il danno ad un modulo non significherebbe l'arresto (cioè lo spegnimento) dell'intero impianto, e dando luogo a migliorate caratteristiche di densificazione e di porosità del prodotto sinterizzato. Inoltre l'invenzione ovvia a molte delle deficienze della rimessa in ciclo associate con la combinazione del forno a scuotimento-aria riducendo i tempi di riscaldamento per portare l' VO_2 alla sua temperatura di ossidazione, permettendo la frattura o frantumazione statica di granuli sinterizzati di VO_2 e producendo con un miglior rendimento una polvere di U_3O_8 per la rimiscelazione.

- SOMMARIO DELL'INVENZIONE -

La presente invenzione si riferisce ad un metodo migliorato per la preparazione di granuli o palli

ne di combustibile nucleare e la rimessa in ciclo di biossido di uranio utilizzando il concetto della radiazione a microonde in un forno di induzione a microonde. Tipicamente, durante il processo di preparazione dei granuli, il biossido di uranio e le polveri leganti organiche vengono mescolati e poi formati e pressati per formare compresse pressate di granuli. Le compresse pressate vengono poi riscaldate, sinterizzate e mantenute alla temperatura di sinterizzazione in un forno a induzione a microonde in un'atmosfera riducente, dopo di che le compresse sinterizzate vengono raffreddate alla temperatura ambiente sotto condizioni atmosferiche continuamente riducenti. Dopo il raffreddamento le compresse vengono frantumate per formare il prodotto desiderato finito di granuli di biossido di uranio. Una quantità di polvere di biossido di uranio di sfrido o avanzo e di granuli di biossido di uranio sinterizzati di scarto generatasi durante la preparazione di granuli è disponibile per essere riciclata in un forno a induzione a microonde dove il materiale viene riscaldato in un'atmosfera ossidante. Nel forno, il biossido di uranio rimesso in ciclo viene ossidato per formare una polvere di U_3O_8 e poi trasportato per essere mescolato con biossido di uranio e pol-

veri leganti organiche nella fase iniziale del processo di preparazione di granuli di combustibile nucleare.

Le varie caratteristiche di novità che caratterizzano l'invenzione sono evidenziate dettagliatamente nelle rivendicazioni allegate alla presente descrizione e che formano parte integrante di essa. Per una migliore comprensione dell'invenzione, dei suoi vantaggi nella conduzione del processo e dei risultati specifici ottenuti nel suo uso, viene fatto riferimento al materiale descrittivo allegato nel quale è illustrata e descritta una tipica realizzazione dell'invenzione.

DESCRIZIONE DETTAGLIATA DELLA REALIZZAZIONE PREFERITA

I granuli di combustibile nucleare realizzati per alimentare reattori nucleari vengono prodotti partendo da una polvere di biossido di uranio (UO_2) (l'industria ha adottato UO_2 anche se la polvere stechiometrica di partenza può essere rappresentata come $UO_{2,05-2,15}$) e mescolandola con una polvere legante organica disponibile in commercio. La quantità del legante organico non è critica ma dovrebbe essere nell'ambito di circa lo 0,1 allo 0,3% del peso della miscela ottenuta - il resto essendo circa dal 99,7 al 99,9% di UO_2 - cioè una quantità sufficiente di legante per tenere insieme le polveri durante la

formatura e la pressatura. Il tempo di miscelazione dovrebbe essere sufficiente per produrre una miscela omogenea. Dopo la miscelazione, la miscela mescolata viene formata e pressata a freddo per formare compresse di granuli pressate verdi, la forza di pressatura essendo quella sufficiente per compat-
tare cioè addensare le polveri all'incirca del 30% della densità teorica della miscela, tale determinazione essendo basata sulla lunghezza, il diametro ed il peso della compressa. Le compresse vengono poi riscaldate e sinterizzate in un forno a induzione a microonde in un'atmosfera riducente che consiste essenzialmente di una miscela di gas di azoto (N_2) e idrogeno (H_2) e, più precisamente, di una miscela di gas di circa il 75% di H_2 ed il 25% di N_2 . Comunque una qualsiasi atmosfera riducente sarebbe idonea. La temperatura di sinterizzazione è nell'ambito da circa 1600° C a 1800° C, e le compresse vengono tenute nel forno a microonde in atmosfera riducente alla temperatura di sinterizzazione per approssimativamente 2 a 6 ore per ottenere una densità della compressa di circa il 95% della densità teorica. La sinterizzazione in un'atmosfera riducente riduce la polvere iperstechiometrica di partenza, UO_2 0,05-2,15 a UO_2 . Dopo la sinterizzazione,

UFF. DAL. M. A. P. 1000

le compresse vengono raffreddate approssimativamente a temperatura ambiente, il raffreddamento venendo condotto in atmosfera riducente. Dopo il raffreddamento le compresse vengono frantumate per dar luogo al prodotto finito desiderato di UO_2 in granuli.

Il sopradescritto processo di fabbricazione di granuli nucleari può anche essere condotto con fasi di processo aggiuntive, introdotte dopo la fase di formatura e di compressione ma prima della fase di sinterizzazione. Tuttavia con fasi addizionali, la forza di pressatura sopra menzionata diventa quella che è sufficiente per compattare le polveri a circa il 44% della loro densità di miscelazione teorica. Le fasi addizionali includono il far passare a forza le compresse attraverso degli schermi o setacci per formare un granulato e poi la pressatura a freddo del granulato in compresse di granuli pressati, la forza di pressatura del granulato essendo quella sufficiente per compattare il granulato ed approssimativamente il 50% della densità teorica. Per di più della polvere di U_3O_8 può essere mescolata con la polvere di UO_2 e con le polveri leganti organiche nella prima fase del processo di preparazione del combustibile, la polvere di U_3O_8 rappresentando approssimativamente il 5% in peso della miscela mescolata.

la rinanza essendo costituita da circa lo 0,1 al 0,3% di legante e circa il 94,7 al 94,9% di UO_2 . L' U_3O_8 contenuto nelle compresse di granuli, a seguito della sinterizzazione nell'atmosfera riducente, viene convertito in UO_2 .

E' stato determinato che l'ossido di uranio con stechiometrie UO_2 a U_3O_8 è direttamente suscettibile alla radiazione di microonde ad approssimativamente 2450 MHz cioè la frequenza di un forno standard a microonde da cucina che riscalda rapidamente a temperature molto elevate al calor rosso. Dovrebbe essere tenuto presente che, mentre un forno convenzionale a microonde è scelto per l'uso perché prontamente disponibile, altri forni a induzione a microonde, convenzionali e non convenzionali, che funzionano a frequenze diverse, sarebbero anche essi idonei. Altri materiali ceramici comprendenti allumina, silice, nichio, litio e grafite non sono così prontamente suscettibili alla radiazione di microonde a 2450 MHz.

Vengono effettuate delle prove per accertare che l'ossido di uranio con stechiometrie UO_2 a U_3O_8 è direttamente suscettibile alla radiazione di microonde disponendo delle compresse di granuli di UO_2 verdi pressati in un tubo di allumina, mettendo il

tubo in un forno convenzionale a microonde a 2450 MHz , prevedendo un mezzo per l'introduzione di un'atmosfera riducente nel tubo, tappando le estremità del tubo con materiale isolante refrattario e riscaldando il tubo, con le compresse, nel forno in un'atmosfera riducente costituita da una miscela di gas H_2 e N_2 . Il riscaldamento venne inizialmente effettuato per due minuti ad un'impostazione della potenza di 20, ciò che significa che il 100% della potenza del forno veniva erogata per il 20% del tempo di riscaldamento. La potenza iniziale di 20, sufficiente per asportare la maggior parte di qualsiasi umidità contenuta, venne aumentata ad un'impostazione della potenza di 30 e mantenuta per cinque minuti per asportare qualsiasi umidità rimasta. Poi la potenza venne aumentata ad un'impostazione di 70 per dieci minuti e quindi aumentata ad un'impostazione di 100 per ulteriori quindici minuti. Il tubo di allumina stesso era trasparente alla radiazione di microonde permettendo il passaggio della radiazione delle microonde e il riscaldamento delle compresse dall'interno verso l'esterno piuttosto che dall'esterno verso l'interno, essendo questa una caratteristica di normali forni a refrattario. Il riscaldamento a 1370°C venne ottenuto dopo solo quindici minuti di esercizio. Un

bagliore tremolante dall'interno del tubo iniziò circa 5 minuti dopo l'impostazione della potenza a 70, tale bagliore diventando costante all'impostazione dell'intera potenza di 100, ed una temperatura di sinterizzazione di 1620°C venne misurata alla superficie esterna del tubo. L'impostazione della potenza di 100 venne mantenuta per altri 15 minuti e poi le compresse vennero raffreddate nel forno ^{circa} alla temperatura ambiente, l'atmosfera riducente venendo continuamente mantenuta. Furono effettuate misurazioni della densità delle compresse che vengono presentate come segue:

Compressa	Diametro	Lunghezza	Peso	Densità	Densità teorica
($\frac{g}{cc}$)	(cm)	(cm)	(g)	(g/cc)	(%)
1 non sinterizzata (controllo)	0,70	1,04	2,24	3,59	91,00
2 sinterizzata	0,59	0,85	2,12	9,12	83,21
3 sinterizzata	0,58	0,73	1,72	8,91	81,30
4 sinterizzata	0,59	0,87	2,01	8,45	77,10

Ulteriori prove verranno effettuate su delle compresse di granuli WO_2 della misura più comunemente usata nella preparazione di granuli di combustibile nucleare. Le prove verranno effettuate come descritto sopra all'eccezione che il tempo di sinterizzazione

venne aumentato a 4 ore e le compresse presentavano un diametro interno di circa 0,3 cm. Vennero effettuate delle misurazioni della densità delle compresse che vengono presentate come segue:

Compressa	Diametro esterno	Lunghezza	Peso	Densità	Densità teorica
($\frac{g}{cc}$)	(cm)	(cm)	(g)	(g/cc)	(%)
1	0,97	1,03	7,12	10,14	92,94
2	0,97	1,11	7,87	10,52	96,02
3	0,98	1,11	7,85	10,43	93,14
4	0,98	1,04	7,02	9,93	90,57
5	0,97	1,04	7,01	10,07	91,92
6	0,98	1,08	7,66	10,41	94,98
7	0,98	1,10	7,76	10,43	95,19
8	0,97	1,17	7,79	9,92	90,48
9	0,98	1,14	7,71	9,86	89,93
10	0,97	1,11	7,61	10,41	93,01

Fu scelta l'allumina per l'uso nella camera di esterificazione perchè essa era in grado di resistere alle elevate temperature generate ma non interagiva con il campo delle microonde. Di conseguenza non potevano essere presi in considerazione componenti metallici perchè essi riflettono le microonde. Durante il processo di preparazione del combustibile nucleare, non occorre che le compresse siano sigillate

in tubi di allumina, in "navicelle" di allumina, contenitori o altro materiale invisibile alla radiazione delle microonde potrebbero essere usati quale mezzo di trasporto per le compresse nel forno a induzione a microonde. Le compresse di prova di biossido di uranio con legante organico e di biossido di uranio e U_3O_8 con legante organico risultarono tutte suscettibili alla radiazione delle microonde dimostrando con ciò che il forno di sinterizzazione a induzione a microonde è una valida alternativa al forno di sinterizzazione del tipo a refrattario.

La rimessa in ciclo cioè il riciclaggio di biossido di uranio di sfrido o avanzo è un'aggiunta importante al processo della preparazione del combustibile nucleare. Durante la preparazione dei granuli si viene generata una quantità di granuli di biossido di uranio sinterizzato e di polvere di biossido di uranio disponibile per la rimessa in ciclo. Granuli sinterizzati che non corrispondono alle specifiche e polvere di biossido di uranio o detrito di frantumazione generato durante la fase di frantumazione o frantumazione delle compresse vengono trasportati in una navicella o in un recipiente di allumina o di altro simile materiale invisibile (cioè non suscettibile) alla radiazione di microonde, in

un forno a induzione a microonde per il ritrattamento ed il riciclo. Inoltre, qualsiasi altro biossido di uranio di sfrido o di avanzo potrebbe essere aggiunto e trattato in questo modo. Il riscaldamento del materiale alla sua temperatura di ossidazione di almeno 200°C nel forno a microonde viene effettuato mediante la radiazione a microonde in un'atmosfera ossidante, generalmente, ma non esclusivamente in aria, nella quale l' UO_2 viene ossidato per formare una polvere di U_3O_8 . Il tempo e la temperatura di riscaldamento specifici non sono critici ma il riscaldamento dovrebbe essere effettuato per un periodo sufficiente per cambiare il materiale in una fine polvere nera, un processo che è una funzione della massa di materiale ma che viene generalmente completato in un campo di temperature compreso approssimativamente fra 400 e 500°C in circa 20 a 40 minuti. Nel forno i granuli vengono riscaldati al punto in cui la superficie esterna del granulo si ossida in U_3O_8 e si separa dal granulo interno di UO_2 a causa delle differenze nella densità fra UO_2 e U_3O_8 . L' UO_2 presentando una maggiore densità. Con l'introduzione di superfici fresche, non ossidate, il processo vuole continuare fino a quando l'intero granulo è ossidato riducendosi in una polvere nera

di U_3O_8 . La polvere di biossido di uranio e il detrito di frantumazione si trovano già in forma di polvere, perciò a seguito del riscaldamento nel forno in atmosfera ossidante il detrito suole venire velocemente trasformato nella polvere di U_3O_8 . Il prodotto ossidato che esce dal forno è una fine polvere di U_3O_8 adatta, dopo il raffreddamento, per essere mescolata di nuovo con polveri di biossido di uranio e di legante organico in un processo di preparazione dei granuli di combustibile nucleare.

Il riscaldamento nel forno di riciclaggio può essere continuo e intermittente. L'ossidazione dei granuli viene però favorita dal riscaldamento a microonde quando il livello della potenza di alimentazione viene alternato, cioè è intermittente una fase di potenza inserita essendo seguita da una fase di interruzione della potenza. Dopo un periodo di potenza inserita seguita da un periodo di interruzione di potenza i granuli di UO_2 si riscaldano in modo estremamente rapido quando la radiazione delle microonde viene ristabilita. Granuli sinterizzati sono stati frantumati completamente semplicemente disinserendo la fonte delle microonde e riinserendola durante l'ossidazione dei granuli. Quando il materiale di UO_2 ha oltrepassato la temperatura di ossidazione

la sua suscettibilità alla radiazione delle microonde è molto elevata. Quando la radiazione delle microonde viene interrotta il materiale comincia a raffreddarsi sempre ancora ossidandosi. Il materiale ritorna immediatamente ad una temperatura corrispondente ad un bagliore rosso quando la radiazione delle microonde viene reintrodotta. Il rapido riscaldamento e raffreddamento fa sì che sollecitazioni termiche tremende si verifichino nella struttura dei granuli. Le sollecitazioni termiche, insieme con le sollecitazioni introdotte a causa della differenza della densità fra UO_2 e U_3O_8 , causano la frammentazione e frattura dei granuli in una condizione statica. Superfici nuove cioè fresche vengono esposte in occasione di ogni ciclo di raffreddamento permettendo che l'ossidazione continui fino ad essere completa.

Le prove di laboratorio hanno dimostrato che campioni di polvere di UO_2 posti in un forno a microonde convenzionale di 2450 MHz sono direttamente suscettibili alla radiazione delle microonde in un'atmosfera ossidante. Un campione di polvere di UO_2 con un peso di circa 3 grammi raggiungerà il bagliore rosso in meno di un minuto e l'ossidazione si verificherà su tutte le superfici a contatto con aria. Le prove hanno anche dimostrato che un granulo sinterizza-

to posto nel campo delle microonde ne percepisce l'effetto nel giro di circa 1 a 2 minuti, il granulo frantumandosi via via, che l'ossidazione progredisce. L'ossidazione del granulo viene favorita impostando il livello della potenza a 50. Il granulo si frantuma a causa delle differenze di densità e delle sollecitazioni termiche indotte quando le microonde vengono inserite e poi disinserite. Una impostazione ridotta della potenza, che forniva una radiazione delle microonde inserita/disinserita, cioè intermittente, intensificava l'ossidazione per la creazione di sollecitazioni termiche e di differenze di densità causando la frattura del granulo e aumentando le superfici fresche di UO_2 disponibili per l'ossidazione.

Sebbene in conformità alle disposizioni di legge si sia qui illustrata e descritta una forma di realizzazione specifica dell'invenzione, gli esperti in materia comprenderanno che potranno essere fatti cambiamenti nella forma dell'invenzione coperta dalle rivendicazioni e che certe caratteristiche dell'invenzione possono qualche volta essere usate vantaggiosamente senza il corrispondente uso delle altre caratteristiche.

Le realizzazioni dell'invenzione in cui si rivendica una proprietà o privilegio esclusivo sono definite come segue:

- 1) Un metodo per preparare granuli o palline di

combustibile nucleare comprendente le fasi di:

- a) mescolazione di una predeterminata quantità di biossido di uranio e di polveri leganti organiche;
- b) formazione e compressione della miscela mescolata per dar luogo a compresse di granuli pressati;
- c) riscaldamento e sinterizzazione delle compresse in un forno a induzione a microonde in un'atmosfera riducente;
- d) mantenimento delle compresse alla temperatura di sinterizzazione nell'atmosfera riducente per un tempo predeterminato;
- e) raffreddamento delle compresse approssimativamente alla temperatura ambiente mentre viene mantenuta l'atmosfera riducente; e
- f) frantumazione delle compresse per ottenere il prodotto desiderato finito in granuli.

2) Il metodo secondo la rivendicazione 1, in cui la compressione è sufficiente per ottenere una densità teorica della compressa di circa il 30%.

3) Il metodo secondo la rivendicazione 1, in cui la compressione è sufficiente per ottenere una densità teorica della compressa di circa il 44%.

4) Il metodo secondo la rivendicazione 1 comprendente inoltre fra le fasi (b) e (c) le fasi di:

far passare a forza le compresse attraverso

schermi e setacci per formare un granulato; e comprimere il granulato per formare compresse di granuli pressati.

5) Il metodo secondo la rivendicazione 4, in cui la compressione è sufficiente per ottenere una densità teorica della compressa di circa il 50%.

6) Il metodo secondo la rivendicazione 1, in cui le compresse vengono sinterizzate in detto forno a induzione a microonde ad una temperatura nell'ambito da circa 1600°C a circa 1800°C.

7) Il metodo secondo la rivendicazione 1, in cui detta atmosfera riducente comprende una miscela di gas H_2 e N_2 .

8) Il metodo secondo la rivendicazione 7, in cui detta miscela di gas è di circa il 75% di H_2 e il 25% di N_2 .

9) Il metodo secondo la rivendicazione 1, in cui detta quantità di biossido di vanadio e di polveri leganti organiche della fase a) è di circa dal 99,7 al 99,9% e dallo 0,1 allo 0,3% del peso rispettivamente.

10) Il metodo secondo la rivendicazione 1, in cui il tempo di permanenza della fase d) è circa di 2 a 6 ore.

11) Il metodo secondo la rivendicazione 1, che

(14) Il metodo secondo la rivendicazione 13, in

un'unità di combustibile miscelata.

organiche in un processo di preparazione di gas

si può con l'aggiunta di uranio e polveri leganti

la preparazione la polvere di U_3O_8 per la miscela-

avente polvere di U_3O_8 e

si può ossidare il biossido di uranio fino a di-

riduzione e miscelare in un'atmosfera ossidante

- miscelare il materiale trasportato nel forno a

a riduzione e miscelare

di ossido e la combinazione di esso in un forno

termici, la polvere di biossido di uranio

- trasportare i granuli di biossido di uranio alla

essere comprendente le fasi di:

to la preparazione di granuli di combustibile mi-

ido di uranio di ossido e di uranio generati duran-

to di uranio alburizzati (ossido e polvere di bio-

(13) un metodo per riciclare granuli di biossi-

5% del peso della miscela in polvere miscelata.

con la quantità della polvere di U_3O_8 e di circa il

(12) un metodo secondo la rivendicazione 11, in

il organiche della fase a).

si può con doti biossido di uranio e polveri leganti

la preparazione di polvere di U_3O_8 per la miscela-

comprende inoltre la fase di aggiungere una quanti-

cui il riscaldamento nel forno a induzione a microonde è continuo.

15) Il metodo secondo la rivendicazione 13, in cui il riscaldamento nel forno a induzione a microonde è intermittente.

"PREPARAZIONE DI COMBUSTIBILE NUCLEARE E RICICLO DI SFRIDI".

RIASSUNTO DELL'INVENZIONE.

Un metodo migliorato per la preparazione di granuli di combustibile nucleare e per il riciclaggio di biossido di uranio utilizzando la radiazione di microonde, in cui forni a induzione a microonde sostituiscono forni convenzionali di sinterizzazione del tipo a refrattario e forni a scuotimento-aria.