

19 RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
INSTITUT NATIONAL
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE
COURBEVOIE

11 N° de publication : **3 129 243**
(à n'utiliser que pour les
commandes de reproduction)
21 N° d'enregistrement national : **21 12053**
51 Int Cl⁸ : **G 21 B 3/00 (2022.01), G 21 K 1/08**

12 **DEMANDE DE BREVET D'INVENTION** **A1**

22 Date de dépôt : 15.11.21.

30 Priorité :

43 Date de mise à la disposition du public de la demande : 19.05.23 Bulletin 23/20.

56 Liste des documents cités dans le rapport de recherche préliminaire : *Ce dernier n'a pas été établi à la date de publication de la demande.*

60 Références à d'autres documents nationaux apparentés :

Demande(s) d'extension :

71 Demandeur(s) : SANGLE-FERRIERE Bruno — FR.

72 Inventeur(s) : SANGLE-FERRIERE Bruno.

73 Titulaire(s) : SANGLE-FERRIERE Bruno.

74 Mandataire(s) : Cabinet NONY.

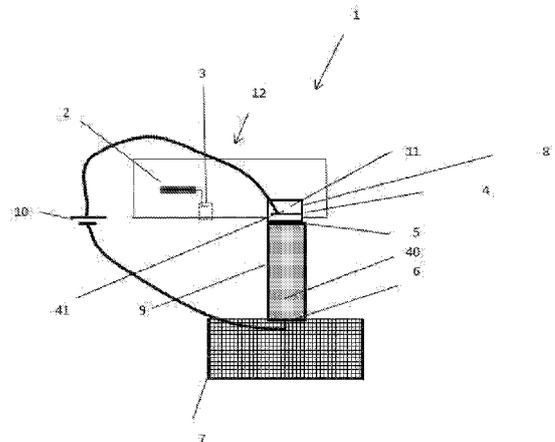
54 Dispositif de mise en œuvre de réactions de fusion nucléaire par ions accélérés.

57 Dispositif de mise en œuvre de réactions de fusion nucléaire par ions accélérés

L'invention concerne un dispositif (1) de mise en œuvre de réactions de fusion nucléaire, comportant :

une enceinte (9) configurée pour contenir un matériau source (11) et une cible (6), un système (12) d'ionisation au moins partielle du matériau source, un accélérateur d'ions (10) configuré pour accélérer le matériau source ionisé vers la cible de manière à provoquer la fusion des noyaux atomiques du matériau source ionisé avec des noyaux atomiques de la cible, un matériau de récupération de chaleur (7) en contact thermique avec la cible, un système de conversion de l'énergie thermique récupérée par le matériau de récupération de chaleur en énergie électrique configuré pour alimenter au moins en partie l'accélérateur d'ions et/ou le système d'ionisation.

Figure pour l'abrégé : Fig. 1



FR 3 129 243 - A1



Description

Titre de l'invention : Dispositif de mise en œuvre de réactions de fusion nucléaire par ions accélérés

Domaine technique

- [0001] La présente invention concerne la mise en œuvre de réactions de fusion nucléaire provoquées par l'impact d'un faisceau d'ions sur une cible.
- [0002] Par « fusion nucléaire », on entend dans le cadre de l'invention un processus par lequel deux noyaux atomiques s'assemblent pour former un noyau plus lourd. Cela diffère en particulier de la spallation, dans laquelle le noyau frappé par une particule incidente se décompose en raison de l'impact.

Technique antérieure

- [0003] A ce jour, l'énergie atomique est en grande majorité produite par des réactions de fission nucléaire qui entraînent la création de nombreux isotopes instables ayant des demi-vies pouvant être très importantes.
- [0004] De plus, les réacteurs de fission nucléaire nécessitent souvent un temps important, par exemple plusieurs jours, pour être arrêtés. Durant ce temps de mise en arrêt, un refroidissement peut être nécessaire pour éviter que les produits de fission encore très actifs ne déclenchent des réactions en chaîne.
- [0005] La fusion nucléaire est actuellement utilisée notamment dans le cadre des armes atomiques, combinée dans ce cas à des réactions de fission nucléaire, et nécessite de très hautes températures et pressions pour que la collision de noyaux nucléaires provoque la fusion de ces noyaux.
- [0006] La mise en œuvre de réactions maîtrisées de fusion nucléaire est donc difficile. Or la fusion nucléaire représente une source d'énergie potentiellement propre et abondante.
- [0007] Il est connu de provoquer la fusion de noyaux de deutérium en les soumettant à une tension élevée, de l'ordre de 40 kV, dans une chambre sous vide. Toutefois, ce procédé déclenche d'une part la création de neutrons et d'autre part ne permet pas de récupérer l'énergie générée par la fusion.
- [0008] La demande EP 2561514 A1 divulgue un réacteur hybride, c'est-à-dire un réacteur de fission nucléaire piloté par un accélérateur de particule. Selon le procédé décrit dans cette demande, un flux de protons est dirigé vers une cible pour réaliser une spallation de noyaux de la cible et ainsi produire des neutrons permettant de contrôler l'activité du cœur du réacteur nucléaire.
- [0009] Si cette demande concerne l'utilisation de particules accélérées pour provoquer la spallation de noyaux, elle ne divulgue pas de processus de fusion nucléaire.
- [0010] Il existe donc un besoin pour proposer un dispositif de mise en œuvre de réactions de

fusion nucléaire qui permette de récupérer l'énergie libérée par des réactions et qui ne nécessite pas de soumettre les réactifs à des conditions de température et de pression élevées.

[0011] Le but de l'invention est de répondre au moins partiellement à ce besoin.

Exposé de l'invention

[0012] Pour ce faire, l'invention a pour objet, selon un de ses aspects, un dispositif de mise en œuvre de réactions de fusion nucléaire, comportant :

- [0013]
- une enceinte configurée pour contenir un matériau source et une cible,
 - un système d'ionisation au moins partielle du matériau source,
 - un accélérateur d'ions configuré pour accélérer le matériau source ionisé vers la cible de manière à provoquer la fusion des noyaux atomiques du matériau source ionisé avec des noyaux atomiques de la cible,
 - au moins un matériau de récupération de chaleur en contact thermique avec la cible, le matériau de récupération de chaleur étant un matériau conducteur thermique, de préférence de l'aluminium, du cuivre ou des nanotubes de carbone, et/ou un matériau caloporteur, notamment de l'air, de l'eau ou un métal liquide, et/ou un matériau absorbeur de chaleur absorbant de préférence la chaleur par le biais d'une réaction chimique ou d'un changement de phase endothermique, le matériau de récupération de chaleur comportant optionnellement des canaux de circulation d'un fluide caloporteur,
 - un système de conversion de l'énergie thermique récupérée par le matériau de récupération de chaleur en énergie électrique configuré pour alimenter au moins en partie l'accélérateur d'ions et/ou le système d'ionisation.

[0014] Par « matériau conducteur de chaleur », on entend dans le cadre de l'invention un matériau à l'état solide dont la conductivité thermique est supérieure ou égale à 5 W/m/K.

[0015] Par « matériau caloporteur », on entend un fluide dont la conductivité thermique est supérieure ou égale à 0,1 W/m/K et dont la capacité calorifique est supérieure ou égale à 0,1 kJ/kg/K.

[0016] Par « matériau absorbeur de chaleur », on entend un matériau qui peut réagir chimiquement ou changer de phase de manière endothermique en absorbant la chaleur.

[0017] Le matériau source est de préférence un isotope de l'hydrogène : du protium, du deutérium ou du tritium, ou une combinaison des dits isotopes. Ces éléments de masses atomiques faibles permettent avantageusement de dégager plus d'énergie lors de leur fusion avec d'autres atomes. Alternativement, le matériau source peut être de masse atomique plus élevée, par exemple du lithium, de l'hélium, du fluor, du sodium, du phosphore, du soufre, du brome, du potassium ou du néon. La masse atomique plus

élevée correspond à une taille du noyau plus grande et donc à une probabilité accrue de réaction nucléaire par projection sur une cible.

[0018] De préférence, le matériau source n'est pas du deutérium si le matériau cible est lui-même du deutérium ou du tritium, ni du tritium si le matériau cible est lui-même du deutérium. En effet, ces réactions produisent des neutrons.

[0019] De préférence, le matériau source et la cible sont choisis pour que les isotopes résultant de la réaction de fusion soient stables. Alternativement, le matériau source et la cible sont choisis pour que les isotopes résultant de la réaction de fusion soient instables et se décomposent par désintégration Beta- ou Beta+.

Ionisation

[0020] Selon un mode de réalisation particulier, le système d'ionisation du matériau source comporte :

- [0021]
- un laser,
 - un guide d'onde d'entrée configuré pour guider la lumière émise par le laser vers une entrée optique de l'enceinte, l'entrée optique étant configurée pour permettre l'illumination du matériau source par la lumière émise.

[0022] Le laser peut être configuré pour émettre une lumière dont la puissance instantanée est suffisante pour permettre l'ionisation du matériau source. Le système d'ionisation peut également comporter un concentrateur d'onde configuré pour superposer une pluralité de cycles de la lumière émise par le laser de sorte à augmenter la puissance instantanée de la lumière émise, le concentrateur d'onde étant de préférence de type Coherent Amplification Network (réseau d'amplification cohérente). De plus, le dispositif peut comporter avantageusement un guide d'onde de sortie configuré pour guider une lumière non absorbée par le matériau source à partir d'une sortie optique de l'enceinte vers l'entrée optique de l'enceinte, et l'enceinte peut comporter une pluralité de miroirs configurés pour réfléchir la lumière émise par le laser entre l'entrée optique et la sortie optique de sorte à illuminer plusieurs fois le matériau source.

[0023] Selon un mode réalisation alternatif, le système d'ionisation peut comporter une source de rayons X configurée pour irradier le matériau source.

[0024] Ainsi, l'ionisation du matériau source est par exemple obtenue par l'irradiation de la source par des rayons X produits par un tube à rayons X placé dans l'enceinte contenant le matériau source. Les rayons X émis par ledit tube ont de préférence une longueur d'onde inférieure à l'énergie de la constante de Planck multipliée par la vitesse de la lumière dans le vide et divisée par l'énergie d'ionisation du matériau source. Les parois de l'enceinte, en-dehors des orifices nécessaires au passage des ions et du matériau source, sont de préférence recouvertes ou flanquées de miroirs à rayons X afin de réfléchir les rayons X dirigés vers les parois. Ces miroirs sont par exemple ceux décrits dans l'article : Schäfers, F., & Cimino, R. (2013). Soft X-ray reflectivity:

from quasi-perfect mirrors to accelerator walls. arXiv preprint arXiv:1308.1295.

[0025] Le matériau d'ionisation est de préférence chauffé à une température à laquelle il est à l'état gazeux. Cela est particulièrement avantageux si celui-ci est du soufre, du potassium, du phosphore, du lithium ou du sodium.

Accélération

[0026] L'accélérateur d'ions est configuré pour accélérer les ions obtenus du matériau source par des champs électriques, soit dans des accélérateurs linéaires pouvant accélérer des flux d'ions continus avec des tensions continues, soit dans des cyclotrons ou des synchrotrons qui peuvent accélérer des paquets d'ions entre deux électrodes dont le signe de la différence de potentiel alterne entre positif et négatif.

[0027] Selon un mode de réalisation, l'accélérateur d'ions est linéaire. L'accélérateur d'ions comprend un générateur de haute tension, relié électriquement à une première électrode agencée dans l'enceinte, de préférence à une première extrémité de l'enceinte, et à une deuxième électrode, la deuxième électrode et la cible étant agencées dans l'enceinte de préférence à une deuxième extrémité de l'enceinte opposée à la première extrémité ; le générateur et les première et deuxième électrodes étant configurés pour générer un champ électrique permettant d'accélérer le matériau source ionisé vers la cible de manière à provoquer la fusion des noyaux atomiques du matériau source ionisé avec des noyaux atomiques de la cible.

[0028] Selon un mode de réalisation alternatif, l'accélérateur d'ions comprend un cyclotron dans lequel entrent les ions produits par le système d'ionisation, les ions étant envoyés par paquets dans le cyclotron, de préférence proche de son centre. Le cyclotron est configuré pour accélérer le matériau source ionisé vers la cible de manière à provoquer la fusion des noyaux atomiques du matériau source ionisé avec des noyaux atomiques de la cible.

[0029] Alternativement encore, l'accélérateur d'ions comprend un synchrotron dans lequel entrent les ions produits par le système d'ionisation, les ions étant envoyés par paquets dans le synchrotron, le champ magnétique du synchrotron étant variable et étant configuré pour confiner le matériau source ionisé dans deux demi-tubes. Le synchrotron est configuré pour accélérer le matériau source ionisé vers la cible de manière à provoquer la fusion des noyaux atomiques du matériau source ionisé avec des noyaux atomiques de la cible. Les ions peuvent quitter le synchrotron pour atteindre la cible par exemple par la suppression du champ magnétique servant à faire tourner les ions entre deux éléments rectilignes dudit synchrotron, les ions continuant alors leur trajectoire rectiligne au lieu de tourner dans l'élément suivant.

[0030] Les parois internes du cyclotron ou du synchrotron ainsi que les parois des électrodes de maintenance optionnelles décrites par la suite, sont avantageusement recouvertes de couches diélectriques, par exemple en polymères ou en verre résistant aux champs

électriques résultant de la différence de potentiel appliquées aux deux dés des cyclotrons, aux deux tubes des synchrotrons ou aux électrodes de maintenance. Les ralentissements des ions dus à l'effet de Bragg demandent pour être compensés, quand la cible est solide, des champs électriques d'intensité supérieure à la plupart des résistances diélectriques des isolants électriques. Les tranches de matériaux cibles sont donc avantageusement espacées d'un rapport de 15 c'est-à-dire de 15 fois leur épaisseur de telle sorte qu'un champ électrique moindre puisse permettre aux ions source de reprendre une vitesse suffisante avant leur entrée dans la tranche suivante de matériau cible. Alternativement la pression de la cible, si celle-ci est gazeuse, est telle que le champ électrique nécessaire à la compensation de l'effet Bragg n'endommage pas les isolants électriques utilisés tels que du verre de quartz.

[0031] Selon un mode de réalisation alternatif, l'accélérateur d'ions comprend une combinaison d'accélérateurs linéaires et de cyclotrons ou de synchrotrons. Ainsi, les ions issus d'un premier accélérateur linéaire sont par exemple injectés dans un cyclotron proche de son centre pour par exemple être dirigés en sortie vers un second accélérateur linéaire. Les ions, s'ils sont injectés dans le cyclotron avec une vitesse dont la composante le long de l'axe du cyclotron est non nulle sont de préférence ralentis dans cette direction par un champ électrique de même direction et de sens opposé engendré par des électrodes situées proches du ou entourant le centre du cyclotron permettant avantageusement d'annuler cette composante de la vitesse tandis que les ions circulent encore dans cette zone.

[0032] L'accélérateurs d'ions est de préférence vide de gaz, c'est-à-dire avec une pression inférieure à 10^{-5} bar. Cela permet avantageusement d'éviter l'effet Bragg de freinage des ions. Ainsi, l'accélérateur d'ions est de préférence protégé à l'entrée et à la sortie de chacun de ses composants (accélérateur linéaire, cyclotron, synchrotron) par des membranes perméables aux ions et imperméables aux gaz présents à l'extérieur et équipé d'une ou de plusieurs pompes permettant de créer un vide au sein des composants de l'accélérateur d'ions. L'accélérateur d'ions est alors configuré de préférence de telle sorte que lesdites membranes puissent être remplacées épisodiquement ou en continu, celles-ci pouvant se dégrader lors de réactions nucléaires avec les ions accélérés ou par simple chauffage dû aux ions qui la traversent.

[0033] Le dispositif selon l'invention peut encore comporter une ou plusieurs des caractéristiques optionnelles suivantes :

- [0034] • le dispositif comporte une ou plusieurs bobines entourant le faisceau d'ions accélérés, agissant en tant que lentilles magnétiques pour concentrer ou maintenir concentré le faisceau d'ions,
- le système de conversion de l'énergie thermique en énergie électrique du dispositif est choisi parmi une pile au zinc ou une pile à hydrogène associée à

- un système de production d'hydrogène à partir de l'énergie thermique,

 - le matériau cible s'il est solide peut être disposé sur un ruban ou une surface mobile permettant de transporter la cible et éventuellement le matériau formé par la réaction nucléaire vers un bain de refroidissement d'où il peut aussi éventuellement être débarrassé du matériau généré lors de la réaction de fusion ou bien subir un apport de matériau cible.
 - si le matériau source est solide ou liquide, l'enceinte comporte de préférence un support réalisé en un matériau transparent à la lumière et configuré pour supporter ledit matériau source,
 - si le matériau source est gazeux, l'enceinte comporte de préférence une entrée de gaz et une sortie de gaz configurées pour permettre la circulation d'un matériau source sous forme gazeuse entre l'entrée de gaz et la sortie de gaz de sorte que le trajet du matériau source croise le trajet de la lumière d'ionisation,
 - l'enceinte comporte une membrane perméable au matériau source ionisé et imperméable au matériau source neutre et agencée entre les première et deuxième électrodes, la membrane étant de préférence constituée d'une pluralité de couches de nitrure de bore hexagonal,
 - le dispositif comporte de préférence une bobine agencée autour de l'enceinte et centrée sur un axe passant par le croisement du trajet du matériau source et du trajet de la lumière ionisante, la bobine étant configurée pour générer un champ magnétique tendant à maintenir le matériau source ionisé dans l'axe du champ électrique d'accélération,
 - les guides d'onde d'entrée et de sortie sont des fibres optiques, l'entrée optique et la sortie optique de l'enceinte comportant chacune de préférence une lentille et une lame anti-reflet,
 - la paroi interne de l'enceinte est au moins partiellement recouverte d'un matériau diélectrique,
 - si le matériau cible est liquide ou gazeux et le matériau produit par la réaction nucléaire est liquide ou solide, le dispositif est de préférence configuré de sorte que les ions sont projetés, du haut vers le bas, vers le matériau cible de façon à ce que le matériau produit puisse descendre sous le matériau cible pour y être récupéré.
 - le dispositif comporte de préférence une électrode intermédiaire agencée entre la première électrode et la cible et reliée à un deuxième générateur connecté à la deuxième électrode, l'électrode intermédiaire étant constituée d'une grille et/ou d'une membrane conductrice, par exemple réalisée en graphène,
 - le dispositif comporte de préférence, proches de la cible une membrane imperméable aux ions et permettant de maintenir autour de la cible une pression

suffisante pour que celle-ci ou le produit de la réaction nucléaire ne s'évapore pas dans le reste de l'enceinte, mais puisse de préférence être évacués,

- l'enceinte du dispositif comporte un support réalisé en un matériau transparent à la lumière émise par le laser et configuré pour supporter un matériau source sous forme solide.

[0035] L'invention concerne également un réacteur, pouvant être un turboréacteur ou un statoréacteur, comportant un dispositif selon l'invention configuré pour introduire le matériau source accéléré dans une enceinte du réacteur de sorte à permettre le chauffage et la dilatation d'un gaz contenu dans l'enceinte du réacteur.

[0036] L'invention concerne également mais sans restriction :

- [0037]
- une utilisation du dispositif selon l'invention pour mettre en œuvre la fusion du deutérium ou du protium en tant que matériau source et de l'aluminium 27 en tant que cible.
 - une utilisation du dispositif selon l'invention pour la production d'hydrogène par thermolyse à partir du cycle soufre iode, le cycle soufre iode étant alimenté par la chaleur récupérée par le matériau conducteur de chaleur.
 - une utilisation du dispositif pour la production d'électricité
 - une utilisation du dispositif pour le chauffage de l'eau ou de la vapeur d'eau
 - une utilisation du dispositif en tant que réacteur chimique pour le chauffage du produit chimique permettant leur réaction, avec ou sans catalyseur, dans l'enceinte contenant le matériau cible
 - une utilisation du système pour la réduction du dioxyde de carbone en carbone et oxygène
 - une utilisation du système pour la régénération du dioxyde de zinc en zinc et oxygène
 - une utilisation du dispositif pour réchauffer l'air ou le gaz et permettre la dilatation de l'air traversant un turboréacteur ou un statoréacteur,
 - une utilisation du dispositif pour mettre en œuvre la fusion du deutérium en tant que matériau source et du lithium 7 en tant que cible,
 - une utilisation du dispositif pour réaliser une soudure, dans laquelle la chaleur générée par les réactions de fusion est transmise par la cible et/ou par le matériau conducteur de chaleur à un matériau fusible,
 - une utilisation du dispositif pour produire de la chaleur, la chaleur étant utilisée pour la décomposition de matières plastiques, la régénération d'oxyde de zinc, la fabrication de ciment, le chauffage de l'eau et/ou la réduction du dioxyde de carbone,
 - une utilisation du dispositif pour chauffer un gaz, tel que de l'air, dans laquelle les ions du matériau source accéléré sont introduits dans un turbo-

réacteur ou dans un statoréacteur à des vitesses inférieures aux vitesses nécessaires pour permettre des réactions nucléaires avec un gaz, tel que de l'air, contenu dans le réacteur, de sorte à chauffer et dilater le gaz contenu dans le réacteur par leur seul ralentissement dû à l'effet Bragg.

Brève description des dessins

- [0038] [Fig.1] La [Fig.1] représente de manière schématique et partielle un premier mode de réalisation du dispositif selon l'invention.
- [0039] [Fig.2] La [Fig.2] est une vue de détail d'une partie du dispositif de la [Fig.1].
- [0040] [Fig.3] La [Fig.3] illustre un deuxième mode de réalisation du dispositif selon l'invention.
- [0041] [Fig.4] La [Fig.4] représente un dispositif selon l'invention associé à un dispositif de génération d'hydrogène.
- [0042] [Fig.5] La [Fig.5] représente un commutateur de lumière utilisé dans un mode de réalisation du dispositif selon l'invention.
- [0043] [Fig.6] La [Fig.6] illustre un réacteur utilisant un dispositif selon l'invention.
- [0044] [Fig.7] La [Fig.7] est une vue de face d'un réacteur utilisant une pluralité de dispositifs selon l'invention.

Description détaillée

Dispositif

- [0045] Tel qu'illustré en [Fig.1], le dispositif de mise en œuvre de réactions de fusion nucléaire 1 selon l'invention comporte un système d'ionisation 12 d'un matériau source 11, une enceinte 9 configurée pour contenir le matériau source 11 et un matériau cible 6, et un générateur de haute tension 10. Le dispositif pourrait également comporter une première enceinte configurée pour contenir le matériau source et une deuxième enceinte configurée pour contenir le matériau cible.
- [0046] Le système d'ionisation 12 est configuré pour ioniser au moins en partie le matériau source 11. Une fois ionisés, les isotopes sources sont accélérés sous l'effet de la tension générée par le générateur 10 entre les électrodes 4 et 6.
- [0047] Dans le mode de réalisation illustré, l'électrode 6 est constituée du matériau cible. La cible est de l'aluminium 27, la source du deutérium et le produit du silicium 29.
- [0048] Afin d'accélérer suffisamment les isotopes sources pour permettre la fusion des isotopes sources accélérés avec des noyaux de la cible, la tension générée par le générateur 10 peut être comprise entre 240 kV et 2,4 millions de volts.
- [0049] La chaleur générée par des réactions de fusion exothermiques est avantageusement récupérée par un matériau conducteur de chaleur 7 en contact thermique avec le matériau cible 6. Le conducteur de chaleur 7 est par exemple à base d'aluminium, de cuivre ou de nanotubes de carbone. Des canaux peuvent avantageusement être formés

dans conducteur de chaleur 7 pour permettre la circulation d'un fluide caloporteur.

- [0050] Sous forme solide, la cible 6 et/ou le matériau conducteur de chaleur sont de préférence agencés sur un plateau amovible de manière à permettre leur remplacement. De manière alternative, la cible sous forme solide et/ou le matériau conducteur de chaleur sont agencés sous forme de plaques ou de films de manière à permettre leur renouvellement continu, par exemple sous la forme d'un bandeau de matière cible défilant continuellement, par exemple à vitesse constante, sous le faisceau d'ions.

Éléments sources et éléments cibles

- [0051] Il est possible d'utiliser en tant qu'isotopes sources et isotopes cibles de nombreux couples d'isotopes de préférence stables qui, en fusionnant, forment un isotope stable. Parmi les réactions possibles dans le cadre de l'invention, une liste non limitative d'exemples de couples d'isotopes de noyaux sources et de noyaux cibles ainsi que les isotopes formés lors de leur fusion est donnée dans le tableau 1, avec leurs nombres de neutrons et numéros atomiques respectifs N et Z.
- [0052] Par « isotope stable », on entend un isotope dont la demi-vie est supérieure à 10^{12} années.
- [0053] D'autres isotopes que ceux mentionnés en tableau 1 peuvent être utilisés dans le cadre de l'invention. Ainsi, l'isotope source peut également être du deutérium obtenu par le procédé de Girdler et l'isotope cible peut être de l'aluminium 27 sous forme liquide ou solide, la réaction de fusion nucléaire étant exothermique et produisant du silicium 29. La source peut aussi être de l'hélium 4 et la cible du tungstène 186 pour produire du platine 195, la réaction étant exothermique ou encore la source étant de l'hélium 4 et là la cible de l'iridium 193, et le produit de l'or 197. La réaction peut aussi être endothermique, tout ou une partie de l'énergie cinétique de l'ion étant absorbée lors de sa fusion avec la cible, l'ion source étant par exemple du bore 11, la cible du tungstène 186 et le produit de l'or 197.
- [0054] L'invention peut également permettre l'utilisation simultanée d'un ou de plusieurs isotopes sources différents ainsi que l'utilisation d'un ou de plusieurs isotopes cibles différents.
- [0055] Les isotopes sources peuvent être introduits dans l'enceinte sous forme gazeuse, solide ou liquide.

Cibles complexes

- [0056] L'invention peut également autoriser l'utilisation en tant que cible de matériaux constitués de molécules complexes, c'est-à-dire de molécules composées de plusieurs éléments différents. L'utilisation de molécules complexes comme éléments cibles permet en particulier d'une part d'utiliser des éléments cibles sous forme gazeuse alors que, non associés à d'autres éléments, ils ne sont disponibles que sous forme solide ou

liquide à températures ordinaires facilitant ainsi l'évacuation de la chaleur produite, mais aussi d'utiliser la chaleur produite par la réaction nucléaire au sein de la cible gazeuse, et y permettre aussi une ou des réactions chimiques.

Enceintes de réaction contenant un catalyseur

[0057] L'enceinte contenant l'élément cible peut aussi contenir des catalyseurs, de préférence situés sur les bords de ladite enceinte de façon à ne pas interagir avec les ions sources, permettant d'utiliser directement la chaleur provenant du ralentissement des ions et de la ou des réactions de fusion pour permettre des réactions chimiques entre les molécules formant la cible.

[0058] [Tableaux1]

Isotope1	N1	Z1	Isotope2	N2	Z2	Isotope3	N3	Z3
Tritium	2	1	Azote 14	7	7	Oxygène 17	9	8
Tritium	2	1	Fluor 19	10	9	Néon 22	12	10
Tritium	2	1	Sodium 23	12	11	Magnésium 26	14	12
Deutérium	1	1	Azote 14	7	7	Oxygène 16	8	8
Deutérium	1	1	Fluor 19	10	9	Néon 21	11	10
Deutérium	1	1	Sodium 23	12	11	Magnésium 25	13	12
Deutérium	1	1	Aluminium 27	14	13	Silicium 29	15	14
Hélium 4	2	2	Carbone 12	6	6	Oxygène 16	8	8
Fluor 19	10	9	Lithium 7	4	3	Magnésium 26	14	12
Hélium 4	2	2	Bore 11	6	5	Azote 15	8	7
Fluor 19	10	9	Bore 11	6	5	Silicium 30	16	14
Fluor 19	10	9	Carbone 12	6	6	Phosphore 31	16	15
Azote 14	7	7	Azote 14	7	7	Silicium 28	14	14
Oxygène 16	8	8	Carbone 12	6	6	Silicium 28	14	14
Néon 20	10	10	Bore 11	6	5	Phosphore 31	16	15
Hélium 4	2	2	Fluor 19	10	9	Sodium 23	12	11
Néon 20	10	10	Carbone 12	6	6	Soufre 32	16	16
Azote 14	7	7	Fluor 19	10	9	Soufre 33	17	16
Fluor 19	10	9	Azote 14	7	7	Soufre 33	17	16
Fluor 19	10	9	Fluor 19	10	9	Argon 38	20	18
Oxygène 16	8	8	Fluor 19	10	9	Chlore 35	18	17
Fluor 19	10	9	Oxygène 16	8	8	Chlore 35	18	17
Chlore 37	20	17	Bore 11	6	5	Titane 48	26	22
Phosphore 31	16	15	Bore 11	6	5	Calcium 42	22	20
Brome 81	46	35	Lithium 7	4	3	Strontium 88	50	38
Fluor 19	10	9	Sodium 23	12	11	Calcium 42	22	20

Fluor 19	10	9	Néon 20	10	10	Potassium 39	20	19
Néon 20	10	10	Fluor 19	10	9	Potassium 39	20	19
Oxygène 16	8	8	Oxygène 16	8	8	Soufre 32	16	16
Fluor 19	10	9	Aluminium 27	14	13	Titane 46	24	22
Hélium 4	2	2	Oxygène 16	8	8	Néon 20	10	10
Oxygène 16	8	8	Néon 20	10	10	Argon 36	18	18
Néon 20	10	10	Oxygène 16	8	8	Argon 36	18	18
Oxygène 16	8	8	Sodium 23	12	11	Potassium 39	20	19
Néon 20	10	10	Néon 20	10	10	Calcium 40	20	20
Fluor 19	10	9	Chlore 37	20	17	Fer 56	30	26
Hélium 4	2	2	Soufre 32	16	16	Argon 36	18	18
Oxygène 16	8	8	Magnésium 24	12	12	Calcium 40	20	20
Hélium 4	2	2	Chlore 37	20	17	Potassium 41	22	19
Chlore 35	18	17	Lithium 7	4	3	Calcium 42	22	20

Fusion de la cible et de la source

- [0059] Ainsi, selon l'invention, on accélère des ions à une vitesse suffisante pour qu'à l'impact avec la cible, l'énergie cinétique accumulée par les ions permette aux noyaux des ions accélérés et de la cible de fusionner. La vitesse des ions et l'intensité des champs électriques dépendent notamment des matériaux source et cible.
- [0060] La cible peut être la destination finale des ions source qui s'y arrêtent, ralentis par ladite cible ou qui fusionnent avec elle. Elle peut être solide : elle est par exemple constituée d'aluminium 27, les ions source pouvant alors être du deutérium pour former du béryllium. La cible peut également être constituée de carbone 12, les ions source étant alors par exemple du néon 20 pour former du soufre 32. La cible peut aussi être liquide ou gazeuse, par exemple constituée d'oxygène 16, la source du néon 20, ou des composés chimiques formés de ces éléments i.e. du dioxyde de carbone. La cible peut également comprendre des composés chimiques issus des recombinaisons des éléments produits ou des éléments produits combinés avec des ions sources ou/et des éléments cibles. Ces réactions issues de recombinaisons peuvent cependant former, selon les isotopes produits des éléments instables. D'autres matériaux source et cible peuvent être utilisés.
- [0061] Dans le cas d'un accélérateur d'ions linéaire, la ou les dernières électrodes de l'accélérateur avant l'impact des ions avec la cible (autrement dit, les électrodes les plus proches de la cible) peuvent être agencées au sein de la cible, notamment si celle-

ci est constituée de matière à l'état gazeux ou à l'état liquide. Les dernières électrodes peuvent également comprendre la cible. Enfin, les dernières électrodes peuvent former un élément distinct de la cible, la cible étant de préférence agencée à proximité immédiate de la dernière électrode.

Maintenance de la vitesse des ions

[0062] Les ions sont ralentis lorsqu'ils pénètrent dans la cible, que celle-ci soit solide, liquide ou gazeuse. On peut donc s'assurer de la présence d'un champ électrique au sein de la cible s'opposant au ralentissement desdits ions, notamment si la cible n'est pas conductrice électriquement. On peut donc disposer à ses extrémités ou au sein de celle-ci une ou plusieurs électrodes de maintenance configurées pour maintenir la vitesse des ions constante malgré les effets qui induisent par ailleurs leur ralentissement. Si la cible est conductrice électriquement on dispose de préférence un corps diélectrique de part et d'autre de l'électrode de maintenance pour que des électrons n'en soient pas arrachés. Si la cible est solide, celle-ci peut être disposée en plusieurs lamelles de part et d'autre desdites électrodes de maintenance.

[0063] Alternativement ou en combinaison, si les ions du matériau source ionisé sont groupés par paquets, un cyclotron peut être configuré pour maintenir leur vitesse ou pour les accélérer lorsqu'ils passent d'un dé de cyclotron à l'autre. Les ions peuvent alors pénétrer dans le cyclotron, de préférence déjà accélérés par un cyclotron d'accélération ou par un accélérateur linéaire, par l'extérieur du cyclotron, la cible assurant sa décélération jusqu'au premier passage entre les deux dés, si ladite cible se trouve, tout ou en partie en dehors de cette zone comprise entre les deux dés. Le dé du cyclotron n'est pas forcément composé de parties cylindriques mais peut, par exemple dans le cas d'un turboréacteur ou d'un statoréacteur, avoir une forme différente permettant par ailleurs de diriger le flux gazeux qui y circule et y est chauffé.

[0064] L'élément source chlore 35, peut ainsi être projeté sur l'élément cible lithium 7 pour former du calcium 42, avec un rendement énergétique, selon les calculs de l'inventeur, plus élevé que si le dispositif n'utilisait pas d'électrode intermédiaire.

Electrodes de collection

[0065] Les électrons arrachés aux dernières électrodes, c'est-à-dire aux électrodes les plus proches de la cible, sont avantageusement utilisés pour compléter les éléments produits par la réaction de fusion nucléaire. Si les éléments produits sont sous forme liquide ou gazeuse, on place de préférence, de part et d'autre de l'élément produit, des électrodes dites de collection, conductrices électriquement, qui sont configurées pour attirer les ions produits lors de la réaction nucléaire et qui, étant plus lourds que les ions sources, ont, à leur création, une vitesse longitudinale moindre que lesdits ions sources et ne sont donc pas forcément contenus dans le faisceau ionique maintenu par un éventuel

champ magnétique longitudinal. Ces électrodes sont avantageusement constituées de tungstène ou d'hexa borure de lanthane (LaB_6) dont les électrons sont extraits facilement si lesdites électrodes de collection sont chauffés respectivement à plus de 2200°C et 1500°C .

[0066] Ces électrodes de collection, et/ou la cible, sont de préférence reliées aux électrodes de l'accélérateur d'ions par un générateur de tension permettant la circulation des électrons depuis l'électrode la plus proche du lieu de formation des ions sources vers la cible ou les électrodes de collection. La ou les électrodes les plus proches de l'électrode de collection sont de préférence reliées auxdites électrodes de collection par un dispositif électrique leur permettant d'avoir un potentiel électrique supérieur au potentiel des électrodes de collection favorisant ainsi la migration des ions cibles vers lesdites électrodes de collection ; si comme dans le cas d'un cyclotron ou un synchrotron, il existe des différences de potentiel entre une pluralité d'électrodes d'accélération, les électrodes de collection peuvent avoir des potentiels différents et inférieurs à ceux des autres électrodes dont elles sont proches. Si l'accélérateur est linéaire et accélère les ions en continu, la différence de potentiel entre les électrodes de collection et l'électrode proche de la source peut être grande, cette différence de potentiel étant alors supérieurs aux tensions d'accélération des ions. Ces électrodes de collection sont de préférence perméables au produit de la réaction nucléaire, notamment si celui-ci est gazeux, ou éventuellement au mélange de l'élément cible et de l'élément produit, pour permettre l'évacuation des éléments produits, mais aussi éventuellement, par l'évacuation des éléments cibles, de la chaleur produite par la réaction nucléaire et le ralentissement des ions source. Ces électrodes peuvent aussi être constituées, suivies ou précédées de membranes semi perméables ne laissant passer que le produit désiré, ou suivies de valves permettant d'ajuster le débit du gaz qui la traverse.

[0067] Si la cible et le produit sont liquides ou solides et que la cible est diélectrique, c'est-à-dire non conductrice électriquement, l'électrode de collection, par exemple constituée d'une grille chauffée constituée de tungstène ou d'hexa borure de lanthane (LaB_6) est avantageusement placée devant la cible et donc aussi devant le produit de la fusion pour pouvoir apporter les électrons permettant aux ions produits de neutraliser leur charge électrique et devenir des atomes à part entière. Le dispositif est de préférence agencé pour permettre le remplacement des dites électrodes de collection. Si l'électrode de collection est proche du produit sans le toucher celle-ci est agencée pour pouvoir céder des électrons au produit de la réaction de fusion, lesdits électrons traversant alors l'espace séparant l'électrode de collection de la cible sous l'effet d'un champ électrique suffisant. Le champ électrique entre la cible ou le produit et la dite seconde électrode étant dirigé vers l'électrode de collection, ralentit les isotopes ionisés

et doit donc être suffisamment proche de la cible, ou bien la vitesse des isotopes ionisés doit être suffisamment grande, en traversant l'électrode de collection pour que les isotopes ionisés ne soient pas ralentis à une vitesse ne permettant plus d'atteindre la cible avant qu'un arc électrique entre la cible ou le produit et ladite électrode de neutralisation ne s'établisse éventuellement.

[0068] Si la seconde électrode est derrière la cible sans la toucher, ladite cible peut accumuler des charges positives jusqu'à ce que des électrons soient arrachés de la seconde électrode, l'accumulation des charges positives créant aussi un champ électrique entre la cible et la deuxième électrode en sens inverse du champ créé par la différence de potentiel entre les deux premières électrodes. La vitesse des ions source est donc de préférence suffisamment grande pour que les isotopes ionisés puissent atteindre la cible et engendrer la réaction de fusion malgré la présence de ce champ électrique entre la cible et la seconde électrode.

[0069] Si la cible est gazeuse, le dispositif comprend avantageusement une membrane perméable aux ions et imperméable à la cible gazeuse permettant aux ions d'être accélérés dans le vide avant d'atteindre la cible. Cette membrane est par exemple constituée de 6 couches de graphène, de graphane, ou de nitrure de bore hexagonal.

[0070] Trajectoire non linéaire des ions dans un accélérateur linéaire

[0071] Le chemin parcouru par les ions source dans la cible peut être de plusieurs mètres, même si la cible est solide si celle-ci est découpée en tranches entre lesquelles sont disposées des électrodes de maintenance. Afin de rendre la cible plus compacte on peut avantageusement placer en son sein ou bien pour les cibles solides, par exemple entre les tranches de la cible, des champs magnétiques générés de préférence par des solénoïdes, ces champs magnétiques perpendiculaires à la direction des ions et leur permettant de tourner pour atteindre la prochaine électrode de maintenance qui n'est alors plus nécessairement dans l'axe de la précédente. Ces solénoïdes permettant de faire tourner le faisceau de particules peuvent être suivis et/ ou précédés de lentilles magnétiques pour maintenir le faisceau d'ion focalisé. Un assemblage de par exemple 15 de ces bobines et de ces électrodes de maintenance sur un chemin en escargot permet alors d'organiser le trajet des ions sources dans un circuit plus compact.

Cyclotron et synchrotron de maintenance

[0072] Alternativement, les ions sont produits par paquets et envoyés dans un cyclotron ou un synchrotron, le matériau cible étant éventuellement mais pas nécessairement disposé entre les deux électrodes en forme de demi-cylindre (communément appelées « dés ») du cyclotron, ou entre les demis tores du synchrotron et y étant éventuellement maintenu par des membranes perméables aux ions sources s'il n'est pas solide, le ralentissement des ions étant compensé par le champ électrique entre les deux dés ou les deux demis tores. La vitesse d'entrée des ions source est de préférence supérieure à la

vitesse permettant leur fusion avec le matériau cible. Le matériau cible s'il est situé entre les deux dés est de préférence situé à la périphérie intérieure du cyclotron, la vitesse des ions y étant là la plus grande. Solide, il peut être remplacé par le renouvellement en continu ou intermittent des lames qui le composent ; liquide ou gazeux, il peut être remplacé par un flux de même nature pénétrant et sortant de l'espace réservé à la cible par des orifices aménagés sur le pourtour du cyclotron ou du synchrotron.

[0073] Cyclotron combiné servant à la fois à l'accélération et pour la fusion

[0074] La cible peut être agencée dans un cyclotron servant à l'accélération des ions. Dans ce cas une paroi de préférence en matériau diélectrique mais imperméable au gaz cible ou aux gaz pouvant résulter de l'échauffement de la cible ou du produit, est avantageusement disposée à l'intérieur du cyclotron, ladite paroi ou certaines de ses parties où les paquets d'ions peuvent la traverser étant perméables aux ions. L'intensité du champ électrique entre les deux dés ou les deux tubes est avantageusement modulée pour d'abord accélérer les ions à la vitesse permettant la fusion tout le long de la traversée du matériau cible, puis stabilisée pour que les ions puissent traverser une pluralité de fois cette matière cible, de préférence jusqu'à être épuisés par les réactions de fusion, un nouveau paquet d'ions pouvant alors avantageusement pénétrer dans le cyclotron. Dans cette variante, les ions étant introduits proches du centre du cyclotron avec une vitesse perpendiculaire au plan de rotation du cyclotron non nulle, on place de préférence des électrodes au-dessus et en dessous du cyclotron qui permettent de décélérer les ions dans cette direction verticale jusqu'à annuler cette vitesse verticale lors de leur sortie du champ électrique créé par ces électrodes. Par « direction verticale », on entend la direction perpendiculaire au plan dans lequel circulent les ions dans le cyclotron.

[0075] La chambre d'ionisation peut aussi se trouver avantageusement au centre du cyclotron, entre les deux dés, ou sur une orbite particulière du synchrotron, de préférence circonscrits par une membrane cylindrique de révolution autour de l'axe du cyclotron ou du synchrotron notamment si les éléments cibles et source sont différents ; les électrons se détachant des éléments source étant alternativement attirés par les parois de l'un puis de l'autre dé ou demi-tube.

Système d'ionisation des isotopes sources

[0076] Le système d'ionisation 12 du mode de réalisation illustré en [Fig.1] est détaillé en [Fig.2].

[0077] Dans l'exemple considéré, le système d'ionisation 12 comprend un laser 2. La lumière produite par le laser est guidée par le guide d'onde d'alimentation 20 vers un circuit de réinsertion 31.

[0078] Le guide d'onde d'alimentation 20 est par exemple une fibre optique monomode.

[0079] Le guide d'onde d'alimentation 20 peut aussi être un guide d'onde rectangulaire et

étroit, dont la largeur et l'épaisseur est par exemple le $1/5^{\text{e}}$ de la longueur d'onde de la lumière du laser. Celle-ci est de préférence polarisée linéairement et son champ électrique est coaxial perpendiculaire au plan du guide d'onde qui amène la lumière près de la fibre optique ou d'un guide d'onde plus grand, par exemple de l'épaisseur et de largeur deux fois la longueur d'onde de la lumière. Ce guide d'onde plus grand ou cette fibre optique transportant la lumière entre la sortie et l'entrée optiques de l'enceinte. Le guide d'onde étroit approche le grand guide d'onde en faisant de préférence un arc de cercle. Cette approche est de préférence unique ; alternativement la lumière issue du laser ou du concentrateur est d'abord divisée pour être répartie dans plusieurs guides d'ondes étroits approchant chacun le grand guide d'onde ou la fibre optique. De telles approches pouvant se faire avantageusement de part et d'autre dudit grand guide d'onde ou de la fibre optique.

- [0080] Le circuit de réinsertion 31 comprend un guide d'onde d'entrée 21 configuré pour guider la lumière circulant dans le circuit de réinsertion 31 vers une entrée optique 32 de l'enceinte 9.
- [0081] Le guide d'onde d'entrée 21 peut être une fibre optique monomode et comporte une extrémité 22 qui est avantageusement recouverte d'une couche anti-reflet et dont l'extrémité est taillée et polie en forme de lentille.
- [0082] De préférence, un premier ensemble de lentilles de focalisation 23 recouvertes de couches anti-reflet est agencé entre l'extrémité 22 du guide d'onde d'entrée et l'entrée optique 32 de l'enceinte 9.
- [0083] Alternativement à l'utilisation d'une couche anti-reflet, le système peut être configuré de sorte que la lumière en sortie de l'extrémité 22 du guide d'onde d'entrée respecte l'angle de Brewster, évitant ainsi un reflet partiel de la lumière à l'interface de l'extrémité 22 et du milieu ambiant (atmosphère ou vide partiel).
- [0084] Une fois que la lumière pénètre dans l'enceinte 9 par l'entrée optique 32, une partie de la lumière générée par le laser interagit avec le matériau source 11 dans l'enceinte 9 de manière à ioniser les isotopes du matériau source.
- [0085] Toutefois, une autre partie de la lumière est susceptible de traverser l'enceinte 9 sans interagir avec des isotopes sources. Afin de récupérer cette lumière non absorbée, l'enceinte 9 peut également comporter une sortie optique 33 configurée pour récupérer la lumière non absorbée dans l'enceinte 9.
- [0086] La lumière peut optionnellement être réfléchié dans l'enceinte par un ou plusieurs miroirs avant d'atteindre la sortie optique 33.
- [0087] De préférence, un deuxième ensemble de lentilles de focalisation 25 est agencé entre la sortie optique 33 et l'extrémité 26 d'un guide d'onde de sortie 34 pour faciliter sa réinsertion dans le guide d'onde 34.
- [0088] Le couplage optique entre la sortie optique 33 et l'extrémité 26 peut être réalisée de

la même manière que le couplage optique entre l'entrée optique 32 et l'extrémité 22.

- [0089] Le guide d'onde de sortie 34 est relié optiquement au guide d'onde d'entrée 21 pour former le circuit de réinsertion 31.
- [0090] Selon un mode de réalisation particulier, les guides d'onde d'entrée et de sortie peuvent former une unique fibre optique monomode.
- [0091] Un dispositif de concentration d'onde, tel qu'un dispositif permettant le blocage de mode peut être intégré au laser dans le but de superposer différents cycles d'une onde de lumière cohérente et ainsi de réduire sa durée tout en augmentant sa puissance instantanée.
- [0092] La durée d'une impulsion en sortie du dispositif de concentration d'onde correspond de manière avantageuse à une longueur de l'impulsion de l'ordre de la longueur d'onde de l'onde cohérente produite par le laser ; l'impulsion est avantageusement répétée à une fréquence choisie de sorte que les particules accélérées par une impulsion ont atteint la cible avant qu'une nouvelle impulsion accélère des particules.
- [0093] Le dispositif de concentration d'onde utilisé est connu en tant que tel. Il peut être du type Coherent Amplification Network tel que décrit dans la présentation « *ICAN and 100 GeV's Ascent* », J. Mourou et al., EuroNNAC, Meeting CERN, 3 mai 2012.
- [0094] Des systèmes d'ionisation utilisant un autre procédé d'ionisation que par laser peuvent également être utilisés dans le cadre de l'invention.

Circuit de réinsertion

- [0095] Le circuit de réinsertion 31, entre l'extrémité 26 du guide d'onde de sortie et l'extrémité 22 du guide d'onde d'entrée, permet de réutiliser la lumière passant à travers l'enceinte 9 sans interagir avec des isotopes sources.
- [0096] De préférence, la somme des chemins optiques parcourus par l'onde lumineuse, c'est-à-dire la somme des distances parcourues dans chaque milieu multipliée par les indices de réfraction desdits milieux, dans une boucle optique complète (par exemple une boucle démarrant et finissant à l'extrémité 22 du guide d'onde d'entrée) est un multiple entier de la longueur d'onde dans le vide de la lumière circulant dans le circuit de réinsertion 31.
- [0097] La longueur de certains éléments dans la boucle est susceptible de varier, par exemple en raison de variations de température. Un élément ayant des propriétés ajustables peut avantageusement être introduit dans la boucle pour contrôler la longueur optique de la boucle.
- [0098] Les propriétés ajustables d'un élément peuvent être par exemple la longueur dudit élément ou encore son indice de réfraction.
- [0099] Dans le cas où les guides d'onde sont des fibres optiques, il est par exemple envisageable de mettre sous tension un segment de fibre optique par des matériaux piézo-électriques de dimensions sensibles à la température, judicieusement choisis.

- [0100] Alternativement, un segment de guide d'onde peut être composé d'une matière, telle que le niobate de lithium, ayant un indice de réfraction ajustable en fonction de grandeurs physiques comme par exemple un champ électrique externe, de sorte à former une cellule de Pockels.
- [0101] Ainsi, des électrodes d'ajustement 29 connectées à un générateur électrique peuvent avantageusement être agencées autour d'un segment de guide d'onde d'indice de réfraction ajustable en fonction d'un champ électrique afin d'ajuster l'indice de réfraction du segment et par là d'ajuster la longueur optique du circuit de réinsertion 31.
- [0102] Il est également avantageux que le guide d'onde d'alimentation 20 comporte un segment ayant un indice de réfraction ajustable, notamment dans le cas où le circuit de réinsertion 31 fait circuler une lumière en paquet d'ondes plutôt qu'une lumière continue. Dans le mode de réalisation illustré en [Fig.2], les électrodes d'ajustement secondaires 30 permettent d'ajuster l'indice de réfraction d'un segment du guide d'onde d'alimentation 20 pour permettre l'introduction de la lumière en provenance du laser 2 à un moment judicieusement choisi en fonction de la phase de l'onde circulant dans le guide d'onde 20.
- [0103] La [Fig.5] illustre un commutateur 70 de lumière pouvant avantageusement être utilisé si le paquet d'ondes est très compact. Le commutateur 70 comprend un prisme biréfringent 71, ou alternativement une lame biréfringente, ainsi que des électrodes 72 configurées pour appliquer un champ électrique sur la cellule de Pockels du prisme 71. Cela permet de modifier l'indice de réfraction optique du prisme 71 pour contrôler le chemin de la lumière dans le prisme. Dans un premier cas de figure, la lumière laser 73 en entrée est dirigée vers la chambre d'ionisation pour former le faisceau de sortie 75. Dans un deuxième cas de figure, la lumière 74 recyclée par le circuit de réinsertion, entrant dans le prisme 71 avec un angle différent de celui de la lumière 73, peut également être dirigée vers la chambre d'ionisation par le même faisceau de sortie 75 grâce à la modification de l'indice de réfraction du prisme 71 au moyen des électrodes 72. De préférence, le circuit de réinsertion 31 comporte une section de contrôle comportant un guide d'onde 27 configuré pour collecter une faible fraction, par exemple 0,1%, de la lumière circulant dans le circuit de réinsertion et pour la diriger vers une cellule photoélectrique 28. Cela permet avantageusement de mesurer le flux lumineux circulant dans le circuit de réinsertion.
- [0104] Il est alors possible d'ajuster, en fonction des mesures réalisées par la cellule photoélectrique 28, les propriétés de l'élément ayant des propriétés ajustables pour maintenir la longueur du parcours optique de la lumière du circuit de réinsertion 31 constante et permettre de maintenir une intensité de flux lumineux maximale.
- [0105] Le circuit de réinsertion 31 peut également comporter un amplificateur optique, par exemple par fibre dopée à l'erbium, par effet Raman ou par amplificateur à semi-

conducteur.

- [0106] Le guide d'onde d'alimentation 20 est configuré pour injecter la lumière issue du laser 2 dans le circuit de réinsertion 31.
- [0107] De préférence, un circuit de réinsertion 31 est mis en œuvre lorsque le train d'onde circulant dans le circuit de réinsertion est au moins deux fois plus long que la longueur dudit circuit, pour permettre à une partie de l'onde de lumière transitant dans le guide d'onde d'alimentation 20 de se coupler à l'onde de lumière circulant dans le circuit de réinsertion.
- [0108] Comme décrit précédemment, il est possible que la lumière du laser soit concentrée par un dispositif de concentration d'onde, par exemple de type blocage de mode. Il est ainsi possible d'obtenir des trains d'onde concentrés, ayant par exemple une longueur d'environ 1000 fois la longueur d'onde de la lumière du laser, les trains d'onde étant par exemple séparés par un temps compris entre 50 ms et 500 ms. Dans ce cas, la lumière circulant dans le circuit de réinsertion étant composée de trains d'onde discontinus, le circuit de réinsertion 31 peut avantageusement prendre la forme d'un unique guide d'onde continu dont l'une des extrémités est l'extrémité 22 et l'autre est l'extrémité 26. Le guide d'onde d'admission 20 est alors configuré pour transmettre la lumière du laser au circuit de réinsertion 31 au moment où un train d'onde passe dans le guide d'onde et pour se découpler du circuit 31 par ailleurs, le couplage et découplage se faisant par exemple par modification, sous l'effet d'un champ électrique produit par les électrodes 30, de l'indice de réfraction du guide d'onde 20 pour sa partie proche du circuit 31.
- [0109] Le circuit de réinsertion comporte de préférence un ou des guides d'ondes proches du guide d'onde en provenance de l'enceinte ou allant à l'enceinte permettant d'en mesurer son ou leur intensité en collectant une portion du flux lumineux qui y circule, dans le sens de la lumière en provenance du laser ou du concentrateur, mais aussi en sens inverse, certains rayons lumineux pouvant avoir été réfléchis dans les divers dispositifs optiques.

Laser du système d'ionisation

- [0110] Dans le mode de réalisation représenté en [Fig.1] ainsi que dans celui représenté en [Fig.2], les isotopes sources sont ionisés par un laser.
- [0111] La longueur d'onde de la lumière produite par le laser est par exemple de 369 nm, 269 nm ou 182 nm. La longueur d'onde produite peut également être plus petite, des lasers de longueur d'onde aussi petites que 13.5 nm étant connus.
- [0112] La lumière peut être produite par des diodes laser. On peut également utiliser un laser à onde continue tel que des VECSELS (lasers à cavité externe verticale émettant par la surface).
- [0113] La longueur d'onde 369nm peut par exemple être obtenue en mélangeant une lumière

laser de 1470 nm avec la seconde harmonique d'une lumière laser de 985 nm.

- [0114] La longueur d'onde 269 nm peut être obtenue en utilisant la 3eme harmonique d'une lumière laser de longueur d'onde 808 nm.
- [0115] La longueur d'onde 182 nm peut être obtenue en mélangeant la 5eme harmonique d'une lumière laser de 1064 nm avec une lumière laser de 1260 nm. Les mécanismes d'obtentions des harmoniques et de mélanges de longueur d'onde sont par exemple décrits dans la demande WO 2018/128963 A1.
- [0116] Selon un mode de réalisation particulier, le laser est utilisé en combinaison avec un dispositif de blocage de mode ou un dispositif d'impulsion comprimée permettant de réduire la durée des impulsions laser en augmentant leur puissance instantanée, tel qu'un dispositif de type Coherent Amplification Network.
- [0117] Le faisceau laser peut être agrandi ou focalisé par des lentilles optiques de sorte que la puissance par unité de surface du faisceau laser n'excède pas les limites de dislocation de certains matériaux utilisés dans le dispositif d'ionisation.
- [0118] La taille des lentilles est avantageusement choisie pour permettre la focalisation du faisceau laser sur une longueur suffisante dans le compartiment 41 où se passe l'ionisation de la source puis atteindre les lentilles 25 du circuit de réinsertion.
- [0119] La fréquence de la lumière produite par le laser peut être doublée ou quadruplée en passant à travers des cristaux non linéaires et non symétriques bien choisis. La fréquence peut aussi être multipliée par cinq en utilisant un procédé de génération d'harmoniques selon lequel le faisceau laser passe à travers un gaz rare tel que l'argon.
- [0120] On peut aussi utiliser une lumière cohérente de 361 nm produite par une diode laser au nitrure de gallium GaN, de bande interdite de largeur 3,44 eV ; ou une lumière cohérente de 188 nm produite par un laser au nitrite d'indium gallium (InGaN) dont la proportion de gallium est choisie pour produire un matériau semiconducteur de bande interdite de largeur 3,3 eV, dont la fréquence est doublée par passage à travers un cristal, par exemple un cristal de fluorure de borate tel que le $\text{KBe}_2\text{BO}_3\text{F}_2$ (KBBF) qui est transparent à des longueurs d'onde aussi petites que 147 nm et supporte des puissances jusqu'à 9.10^{11} W/cm².
- [0121] On peut aussi utiliser une lumière cohérente de 166 nm produite par un laser à puits quantique ou par un procédé de génération d'harmoniques par passage de deux faisceaux laser générés par un laser titane-saphir dans de l'argon gazeux à une pression de 440 mb.
- [0122] Cependant, seule une partie du faisceau laser soumis à un traitement de multiplication de la fréquence est susceptible de voir effectivement sa fréquence modifiée, et ceci en particulier si la génération d'harmoniques se fait dans un milieu gazeux.
- [0123] On pourra donc avantageusement mettre en œuvre un autre circuit de réinsertion similaire au circuit de réinsertion 31 précédemment décrit permettant de recycler la

lumière destinée à engendrer la production d'harmoniques. La séparation entre la lumière de fréquence augmentée et la lumière de fréquence initiale peut être faite au moyen de prismes dispersifs ou de filtres de Bragg.

- [0124] Les trains d'onde produits avec un laser en combinaison avec un blocage de mode est répété à des fréquences pouvant être comprises entre 0,1 kHz et 10 kHz. Toutefois, le premier circuit de réinsertion pour trains d'onde discontinus tel que décrit plus haut et illustré en [Fig.2] a pour effet de faire circuler l'onde en boucle et donc de répéter les trains d'onde à des fréquences égales à la vitesse de la lumière dans le circuit divisée par la longueur totale du circuit.
- [0125] La lumière circulant dans le circuit de réinsertion pour trains d'ondes discontinus est susceptible de perdre de la puissance par atténuation entre deux impulsions successives, en raison d'un degré d'opacité des matériaux guidant la lumière et de ses traversées de la chambre d'ionisation.
- [0126] Les circuits de réinsertion ne peuvent réinsérer que de la lumière de longueur d'onde supérieure à 150 nm, dans la mesure où peu de verres ou de cristaux sont transparents à des longueurs d'onde plus petites.

Enceinte

- [0127] L'enceinte 9 est configurée pour contenir les isotopes sources et les isotopes cibles.
- [0128] L'enceinte 9 peut être divisée en un compartiment 41 destiné à contenir les isotopes sources et à permettre leur ionisation, et en un conduit d'accélération 40 dans lequel les isotopes ionisés sont accélérés vers la cible 6.
- [0129] En particulier, si les isotopes sources sont sous forme gazeuse, l'enceinte 9 peut comporter un compartiment étanche 41 dans lequel la pression est de préférence ajustable de manière à ajuster l'intensité du flux de noyaux sources accélérés vers la cible 6.
- [0130] Comme décrit plus bas, il est également possible que le compartiment 41 forme une partie d'un circuit du gaz source.
- [0131] Le compartiment 41 peut comporter une électrode secondaire reliées à un générateur secondaire et configurées pour entraîner les isotopes ionisés se trouvant ou créés entre l'électrode 4 et elle-même, pour ensuite permettre leur accélération vers la cible 6. Le lieu d'ionisation des isotopes sources peut être séparé de l'électrode secondaire ou de l'électrode 6 par une membrane perméable aux ions et imperméable au gaz source, par exemple réalisée en graphène ou en graphane. La membrane peut être réalisée par exemple par une pluralité de feuilles de graphène, de bore hexagonal ou de graphane disposées sur une grille afin de produire une membrane de grande taille. Si le matériau est conducteur, comme le graphène, la membrane peut aussi constituer l'électrode secondaire.
- [0132] De préférence, l'enceinte 9 est entourée au niveau des isotopes sources, c'est-à-dire

au niveau du compartiment 41, par une bobine 8 configurée pour générer un champ magnétique, avantageusement compris entre 0,1 T et 10 T, d'axe parallèle au champ électrique généré par le générateur 10 et tendant à maintenir les isotopes sources ionisés dans l'axe de la bobine. La bobine 8 est centrée sur un axe passant par le croisement du trajet du matériau source et du trajet de la lumière.

- [0133] Ce champ magnétique permet d'empêcher les isotopes ionisés de se déplacer longitudinalement dans une direction autre que la direction d'accélération définie par le champ électrique généré par le générateur 10 entre les électrodes 4, 6. Cela limite le contact des isotopes ionisés avec les parois de l'enceinte 9, tout en maintenant les isotopes ionisés près de l'axe du champ électrique.
- [0134] Dans le mode de réalisation de la [Fig.1], l'enceinte 9 comporte une membrane 5 perméable aux isotopes ionisés mais imperméable aux isotopes sous forme gazeuse afin d'empêcher le passage du gaz source dans le canal d'accélération 40. Il peut s'agir d'un assemblage de six couches de nitrure de bore hexagonal connu en tant que tel, comme décrit dans « *Vapor-liquid-solid growth of large-area multilayer hexagonal boron nitride on dielectric substrates* », Z. Shi et al., Nature communications, 11(1), 1-8, 2020 et dans « *Large Area Monolayer Hexagonal Boron Nitride on Pt foil* », J.H. Park et al., Acs Nano, 8(8), 8520-8528, 2014.
- [0135] Ainsi, la membrane 5 est agencée dans le canal d'accélération 40 à proximité du compartiment 41. L'emplacement de la membrane 5 est choisi de sorte que la valeur du champ électrique au niveau de la membrane 5 est inférieur au seuil de claquage du gaz source, ce seuil dépendant de la pression du gaz et pouvant être évalué à l'aide de la loi de Paschen.
- [0136] Les isotopes ionisés sont accélérés dans le conduit d'accélération 40 par le champ électrique généré par le générateur 10. Comme les isotopes ionisés génèrent un champ électrique radial, c'est-à-dire orthogonal à l'axe du conduit d'accélération 40, certains isotopes ionisés peuvent être déviés vers l'extérieur du conduit d'accélération 40. Dans ce cas, et comme illustré en [Fig.3], il est avantageux de prévoir une bobine 15 entourant le canal d'accélération 40 et configurée pour générer un champ magnétique tendant à maintenir les isotopes ionisés dans l'axe de la bobine 15, qui peut être confondu avec l'axe du conduit d'accélération 40. Le champ magnétique généré peut par exemple être compris entre 0,1 T et 10 T.
- [0137] Les calculs effectués par l'inventeur montrent que la déviation des isotopes ionisés due au champ électrique généré par les isotopes ionisés peut être faible, selon la configuration du dispositif en particulier grâce à l'influence du champ magnétique généré par les bobines 8 et 15. Dans ce cas, on veillera de préférence à dimensionner le conduit d'accélération 40 de sorte que les isotopes ionisés ne puissent pas atteindre les parois internes du conduit d'accélération 40. De même, le champ appliqué par la

bobine autour de l'enceinte 9 peut aider à maintenir le faisceau d'ion en formation dans l'enceinte 9 autour de l'axe d'accélération et la taille de la membrane 5 peut être dimensionnée pour que tous les ions accélérés puissent la traverser.

[0138] L'électrode 6 est de préférence agencée à une distance précise de l'électrode 4, cette distance dépendant notamment du nombre d'isotopes ionisés projetés sur la cible 6 par unité de temps et du champ électrique maximal toléré dans l'enceinte 41.

Conduit d'accélération

[0139] Les ions produits par l'ionisation du matériau source sont accélérés par un champ électrique généré par le générateur 10 entre les électrodes 4, 6. Du fait du ralentissement des ions dans le matériau cible, l'énergie cinétique des ions est, pour les ions de deutérium projetés sur le lithium 7 de préférence de l'ordre de 3,5 fois l'énergie créée par la réaction de fusion soit environ 60 MeV, permettant ainsi la pénétration desdits ions dans la cible. Pour la réaction nucléaire où des ions de protium sont projetés sur du tritium gazeux, des électrodes de maintenance étant installées dans le cœur du tritium cible, la vitesse des ions pénétrant dans le matériau cible est de préférence de l'ordre de 500 fois l'énergie cinétique minimum permettant la réaction nucléaire, soit 100MeV, le ralentissement dû à l'effet Bragg étant moindre à ces vitesses.

[0140] L'axe du champ électrique est de préférence orthogonal au trajet de la lumière ionisant les isotopes sources, lorsque l'ionisation est réalisée par laser.

[0141] Les électrodes 4 et 6 ne sont pas nécessairement de même géométrie ou dimensions, les lignes de champ du champ électrique ne sont donc pas nécessairement parallèles entre elles.

[0142] Les isotopes ionisés sont accélérés entre les électrodes 4 et 6 dans un conduit d'accélération 40 de l'enceinte 9.

[0143] Comme les isotopes sont chargés électriquement, la paroi interne du canal d'accélération est avantageusement composée ou revêtue d'un matériau diélectrique, empêchant ainsi la paroi de céder des électrons.

[0144] Le matériau cible 6, solide ou liquide est, dans l'exemple illustré en [Fig.1], disposé à une extrémité de l'enceinte 9 et du canal d'accélération 40 opposée à celle où est disposée la source 11 et forment l'électrode 6. Le matériau cible peut également être agencé sur un support conducteur formant l'électrode 6.

[0145] Comme illustré en [Fig.3], le dispositif selon l'invention comporte optionnellement une électrode intermédiaire 14 et agencée dans le canal d'accélération 40, entre les électrodes 4 et 6. L'électrode intermédiaire permet de réduire l'accélération et donc aussi la vitesse des ions dans la chambre d'ionisation, notamment pour empêcher, comme dans le cas du deutérium que ceux-ci ne réagissent ensemble nucléairement, canalise les lignes de champ électrique et permet l'accélération des isotopes ionisés

vers l'électrode intermédiaire avant que les lignes de champ soit ne divergent vers l'électrode 6, soit soient détournées vers l'électrode 6 qui peut être placée dans un axe différent de l'axe d'accélération liant l'électrode 4 à l'électrode intermédiaire, les ions pouvant de plus être déviés par un champ magnétique non longitudinal. L'utilisation d'une électrode intermédiaire peut aussi permettre d'avoir une accélération des ions différente après ladite électrode intermédiaire 14, notamment si les ions doivent être accélérés avec une tension supérieure à 60 millions de volts.

- [0146] Ainsi, la cible peut être soumise à un bombardement d'isotopes ionisés dirigés et concentrés.
- [0147] L'électrode intermédiaire 14 est par exemple formée par une grille dont les mailles de forme carrées ont une longueur de l'ordre du centimètre et une épaisseur de l'ordre du millimètre. Alternativement, l'électrode intermédiaire 14 est formée d'une ou de plusieurs membranes conductrices, par exemple réalisées en graphène ou en graphène métallo-organique.
- [0148] L'électrode intermédiaire 14 est reliée électriquement à l'électrode 6 par un générateur de tension dont le voltage est judicieusement choisi en fonction de la distance entre les électrodes 6 et 14.
- [0149] Une bobine 16 configurée pour générer un champ magnétique ajustable adapté pour dévier les isotopes ionisés peut avantageusement être agencée entre l'électrode intermédiaire 14 et la cible 6. Le champ magnétique généré par la bobine 16 peut être ajusté pour permettre au faisceau d'isotopes ionisés de balayer une surface de la cible 6 ou de choisir la zone de la cible 6 destinée à être impactée par le faisceau d'isotopes ionisés.
- [0150] Des lentilles magnétiques telles que celles utilisées dans des tubes cathodiques de téléviseurs peuvent aussi être utilisées pour focaliser et diriger le faisceau d'isotopes ionisés.

Accélération des isotopes ionisés

- [0151] Le champ électrique généré par le générateur 10 entre les électrodes 4 et 6 permet d'accélérer les isotopes ionisés. Le générateur 10 est configuré pour générer de fortes tensions, par exemple supérieures à 30 000 V et inférieures à 80,000,000 V permettant la fusion nucléaire et, de préférence permettant des vitesses d'ions optimisant le rapport énergie de fusions sur énergie d'accélération. Le générateur 10 est par exemple formé de générateurs commercialisés par la société Genvolt sous le nom de Perseus et montés en série.
- [0152] L'électrode 4 est de préférence placée dans le compartiment 41.
- [0153] Elle peut également être placée dans le conduit d'accélération 40, par exemple entre le compartiment 41 et la membrane 5. Cela permet avantageusement de limiter les contacts avec le gaz source afin d'éviter l'apparition d'effets de claquage du gaz source. Dans ce cas, l'électrode 4 est de préférence formée par une membrane poreuse

et conductrice, par exemple réalisée en graphène ou en graphène organométallique.

[0154] L'électrode 6 constitue la cible ou un support pour celle-ci, en particulier si ladite cible n'est pas conductrice.

[0155] L'électrode 4 est conductrice, ce qui lui permet de conduire et évacuer les électrons produits par l'ionisation des isotopes sources.

[0156] Si les ions sont produits en dehors du champ électrique, ceux-ci restent entourés d'électrons qui oscillent autour et assurent la neutralité électrique de l'ensemble. Les ions doivent ainsi migrer, mais par leur agitation thermique jusqu'à se trouver dans le champ électrique qui attire alors les électrons vers la cathode et les ions vers l'anode.

[0157] Pour éviter l'accumulation d'ions à de vitesses faibles, le champ électrique dans la zone d'ionisation est de préférence choisi élevé quoi qu'inférieur à une valeur pouvant provoquer le claquage du gaz ionisé. Le champ électrique peut par exemple avoir une valeur de $4 \cdot 10^5$ V/m, le gaz pouvant être ionisé sur une épaisseur importante, en particulier si la section du rayon lumineux d'illumination est importante, la tension d'accélération des ions est de préférence choisie pour que même les ions produits les plus proches de la membrane soient accélérés à la vitesse permettant leur fusion avec la cible.

Matériaux sources sous forme gazeuse

[0158] Le gaz source peut être introduit dans l'enceinte d'ionisation au moyen d'un détendeur. Cependant lorsque les isotopes sources sont sous forme gazeuse et sont consommés par l'ionisation dans des volumes et à des cadences qui ne permettent pas leur remplacement homogène, ou pour éviter que des ions ne soient produits à une distance indésirée de l'électrode 4 (les dimensionnements des tension d'accélération pouvant être adaptés à une telle distance), ou pour concentrer la production d'ions dans le champ électrique, le gaz source est de préférence amené dans l'enceinte 9 par l'intermédiaire d'un premier tuyau dont l'extrémité donnant dans l'enceinte 9 forme une buse. Le gaz est de préférence ensuite aspiré vers un deuxième tuyau agencé dans l'axe de la buse du premier tuyau. L'extrémité du deuxième tuyau donnant sur l'enceinte 9 est de préférence formée en un entonnoir. L'entrée du conduit d'accélération 40 des ions se trouve alors de préférence à proximité de l'intersection du jet de gaz et du trajet de la lumière en provenance de l'entrée optique 32 au sein de l'enceinte 9.

[0159] Le premier et le deuxième tuyaux sont de préférence connectés à une pompe permettant d'accélérer la circulation du gaz dans les tuyaux, ainsi qu'à une réserve de gaz source permettant d'introduire ce dernier dans le dispositif et d'en ajouter au fur et à mesure qu'il est consommé.

[0160] Le gaz source circule alors dans un circuit de circulation du gaz.

[0161] Un dispositif de filtration permettant de filtrer le gaz circulant pour en éliminer les

impuretés peut avantageusement être agencé dans le circuit de circulation du gaz.

- [0162] Un dispositif configuré pour produire un vide dans le compartiment de l'enceinte 9 où circule le gaz et optionnellement pour réintroduire le gaz source dans le circuit peut avantageusement être utilisé.

Protections antineutron

- [0163] Si les matériaux cibles sont susceptibles de produire des neutrons, on agence de préférence autour du dispositif une paroi de protection capturant les neutrons.

- [0164] La paroi de protection capturant les neutrons peut contenir un matériau ralentissant les neutrons tel que de l'eau, de préférence en-dessous de sa température critique de 374 °C, ou de l'hydru de calcium CaH_2 , de préférence en-dessous de sa température de fusion de 816°C, au sein desquels sont plongés des tubes ou des billes de bore ou encore des tubes contenant de l'hélium 3. Une épaisseur de 10 cm d'eau permet de diviser par environ 2,7 le nombres de neutrons rapides traversant la protection.

Protection anti-rayons gamma

- [0165] L'enceinte où se produit la fusion mais aussi l'enceinte d'ionisation et la protection antineutrons si des neutrons sont susceptibles d'être produits, sont de préférence entourées d'une paroi de protection absorbant les rayons gamma. Une telle paroi est par exemple composée de plomb d'une épaisseur de 35cm ou de tungstène d'une épaisseur de 21cm, afin de protéger l'environnement des rayons gamma que les réactions nucléaires produisent et de les convertir en chaleur.

- [0166] On peut également utiliser une paroi en iridium.

- [0167] La protection anti rayons gamma est de préférence refroidie par une circulation interne d'un liquide caloporteur ou de composés chimiques tels que décrits précédemment réagissant de manière endothermique pour à la fois refroidir ladite protection anti rayonnement, capturer l'énergie issue de la réaction nucléaire, transformer ladite énergie en énergie chimique ou effectuer une ou des transformations chimiques désirées.

- [0168] Les liquides circulant dans la protection anti rayons-gamma absorbent aussi des rayons gammas. L'épaisseur de la protection anti rayons gamma est de préférence calculée pour que la dose de rayonnements s'échappant du dispositif annuellement, et à tout moment, n'excède pas les limites réglementaires de protection de la santé.

Géométrie des protections

- [0169] De plus, une configuration permettant la déviation de la trajectoire des ions dans leur faisceau d'accélération à l'aide de champs magnétiques et éventuellement d'électrodes intermédiaires est de préférence utilisée de façon à protéger l'environnement et éventuellement la chambre d'ionisation des rayons gamma. Les ions produits dans la chambre d'ionisation peuvent par exemple contourner une paroi de protection anti

rayons gamma séparant la chambre de réactions nucléaires de la chambre d'ionisation.

[0170] La configuration peut être encore améliorée en faisant transiter le faisceau d'ions dans une cavité non rectiligne disposée dans le matériau absorbant les rayons gammas de telle sorte que aucun rayon gamma ne peut aller en ligne droite depuis son lieu de production à l'entrée de la conduite. Il en est de même des autres cavités permettant par exemple d'évacuer le matériau produit, en particulier si ceux-ci sont gazeux et n'ont qu'un faible pouvoir d'absorption des rayons gamma. Dans le cas d'un turbo-réacteur ou d'un statoréacteur, le faisceau d'ions peut par exemple être avantageusement restreint à la périphérie ou au contraire au centre de celui-ci de telle sorte que les entrées et sorties dudit réacteur soient toutes séparées du lieu de réactions nucléaires par la protection anti rayons-gamma, comme par exemple représenté dans la [Fig.6].

[0171] La [Fig.6] représente un turboréacteur ou statoréacteur 80 configuré en conséquence et comportant un dispositif de mise en œuvre de réactions de fusion nucléaire selon l'invention.

[0172] Le réacteur 80 s'étend le long d'un axe 105 et comporte une protection anti rayons gamma 86 par exemple en tungstène, en fer ou en inox, recouverte d'une protection contre les rayonnements infrarouges 81 qui réfléchit le rayonnement thermique généré par certaines parties du dispositif. La paroi intérieure de la protection contre les rayons gamma est de préférence revêtue d'un revêtement diélectrique 82. Un liquide caloporteur 83, par exemple du plomb à l'état liquide, peut circuler au sein de la protection anti rayons gamma 86 pour récupérer la chaleur produite. L'épaisseur de la protection anti rayons gamma est avantageusement variable (non représenté) en fonction de la position par rapport aux sources d'émission des rayons gamma décrites plus bas.

[0173] Le dispositif 80, s'il est un turboréacteur, comporte un compresseur 84 agencé au niveau de l'entrée d'air 100.

[0174] L'air entre dans le réacteur 80 par l'entrée 100, éventuellement compressé par le compresseur 84. Il est ensuite chauffé dans une enceinte principale 93, notamment par le flux d'ions ralentis par effet Bragg et réagissant nucléairement avec le diazote et le dioxygène de l'air sous pression, le long de la paroi de la cavité.

[0175] Un générateur d'ions 85, par exemple des ions de deutérium, produit des ions. Les ions sont dirigés vers un accélérateur d'ions 87 configuré pour accélérer les ions. En sortie de l'accélérateur 87, les ions pénètrent dans une première enceinte 88, avantageusement configurée pour permettre des premières réactions nucléaires avec des matériaux cibles contenus dans l'enceinte 88, par exemple du di-deutérium ou du dihydrogène maintenus à une pression supérieure à leur pression critique, par exemple à 15 atmosphères, ou du lithium 6 ou 7 ou du bore.

- [0176] La première enceinte 88 comporte des premières électrodes de maintenance 98 permettant de maintenir la vitesse des ions au sein du matériau qu'ils traversent en compensant la perte d'énergie cinétique. L'enceinte 88 peut avantageusement contenir une pluralité de matériaux différents, notamment s'ils sont séparés par des électrodes de maintenance, permettant ainsi de chauffer ces matériaux cibles à des températures différentes et avec des puissances différentes appropriées aux réactions chimiques utilisées pour la génération d'électricité. Des deuxième électrodes de maintenance 89 agencées en sortie de l'enceinte 88 accélèrent les ions dans l'air comprimé à l'intérieur du stato-/turbo en direction de la dernière électrode 91, agencée sur la paroi intérieure de la protection 86. Les ions issus de réactions nucléaires avec les molécules d'air sont neutralisés électriquement par les électrodes 90, agencées sur la paroi intérieure de la protection 86 entre les deuxième électrodes de maintenance 89 et la dernière électrode 91.
- [0177] Les ions produisent ainsi de la chaleur par effet Bragg. Ils produisent également un rayonnement gamma dans une section 94 du réacteur 80, le rayonnement étant généré par les réactions de fusion entre les ions et des noyaux de l'air comprimé au sein du réacteur 80. La section 94 est définie par les électrodes 89, 90, 91. Le rayonnement produit dans la section 94 se propage en partie dans l'enceinte principale 93. La géométrie du réacteur 80 est telle que le rayonnement dans certaines directions est toutefois arrêté par des protections anti-rayons gamma 95 et 99 protégeant respectivement la sortie 92 et l'entrée 100 du dispositif. Ainsi, la géométrie du dispositif 80 définit un volume 97 au sein du dispositif qui est irradié par le rayonnement gamma produits par les réactions de fusion des ions accélérés avec l'air comprimé.
- [0178] Le liquide caloporteur 83 et/ou les matériaux cibles contenus dans la première enceinte 88 sont avantageusement mis en circulation dans un circuit de refroidissement pour être refroidis et transmettre la chaleur à un dispositif de conversion énergétique de la chaleur en électricité. Cela permet avantageusement de fournir de l'électricité à l'accélérateur d'ions 87 et aux électrodes 89, 90 et 91. Ce dispositif de conversion, les électrodes 89, 90, 91, le générateur d'ions 85, l'accélérateur d'ions 87, la première enceinte 88, le liquide caloporteur 83 constituent un ensemble formant un dispositif de mise en œuvre de réactions de fusion nucléaire selon l'invention.
- [0179] Le choix du liquide de refroidissement et des matériaux cibles peut être influencé par leurs températures caractéristiques. On peut par exemple chercher à mettre en œuvre certaines réactions chimiques particulières pour lesquelles il sera préférable que les matériaux soient à l'état liquide ou gazeux à ces températures caractéristiques.
- [0180] La vitesse des ions à la sortie de l'enceinte 88 est notamment déterminée par l'intensité du champ électrique généré par les électrodes 89, 90 et 91 et permet ainsi de contrôler la puissance de chauffage de l'air du réacteur. Une modulation de la pression

dans l'enceinte 88, par exemple par vidage partiel, peut aussi permettre de contrôler la part d'énergie destinée à une production électrique par conversion de chaleur. Selon les calculs de l'inventeur, la proportion de chaleur dégagée par des réactions nucléaires entre du deutérium et du di-deutérium peut représenter 55% de l'énergie nécessaire pour l'accélération des ions. Cette proportion atteint 35% si la réaction nucléaire se produit entre du deutérium et du dihydrogène, l'énergie nécessaire pour l'accélération des ions étant majoritairement dissipée par effet Bragg sous forme de chaleur dans le matériau traversé par les ions.

[0181] La [Fig.7] représente en vue de face un statoréacteur ou un turboréacteur 80 comportant une pluralité de dispositifs 101, 102, 103, 104 de mise en œuvre de réactions de fusion nucléaire selon l'invention, chacun configuré comme le dispositif décrit dans le mode de réalisation de la [Fig.6]. Les dispositifs 101, 102, 103, 104 peuvent être agencés de manière équi-angulaire autour de l'axe 105.

Protections anti ultra-violets et rayons X

[0182] Le compartiment 41 où l'ionisation de la source prend place, le laser 2 et le circuit de réinsertion 31 sont avantageusement protégés par une paroi en acier inoxydable, par exemple ayant une épaisseur comprise entre 1 mm et 5 mm, en particulier 2 mm, si la longueur d'onde de la lumière utilisée pour l'ionisation est inférieure à 100 nm.

[0183] Des rayons X peuvent être produits notamment dans un plan perpendiculaire à l'accélération ou la décélération des ions, dans la chambre de réaction nucléaire du fait de la décélération des ions, ou leurs de leur déviation notamment si la chambre de réaction est dans un cyclotron ou un synchrotron. La protection anti rayons gamma permet avantageusement de protéger de ces rayons X si la décélération ou l'accélération a lieu dans l'enceinte contenant le matériau cible ; cependant une protection particulière doit être placée autour des autres lieux où de telle accélération et décélération peuvent avoir lieu, notamment autour de l'accélérateur d'ions et autour du synchrotron et cyclotron.

Capteurs

[0184] Des capteurs contrôlant notamment la déformation, la température et l'accélération des structures du dispositif et notamment des dispositifs de protection anti rayons-gamma sont avantageusement utilisés pour stopper l'accélération et/ou la production d'ions avant que celui-ci ne s'échauffe anormalement ou perde certaines de ses protections, notamment celles anti rayons gamma et anti neutrons.

Applications

Production d'isotopes médicaux

[0185] L'invention permet d'utiliser en tant qu'isotopes sources et isotopes cibles de nombreux couples d'isotopes. Il est en particulier possible de choisir les isotopes

sources et cibles de manière à obtenir des isotopes à usage médical, tels que le technétium 99m, le fluor 18, le thallium 201, l'iode 123, l'iode 131 et le gallium 67.

Production d'hydrogène par cycle soufre-iode

- [0186] Lorsque les réactions de fusion entre les isotopes sources et les isotopes cibles sont exothermiques, la chaleur dégagée par la fusion peut être récupérée par le matériau conducteur de chaleur 7.
- [0187] Avantagement, le matériau conducteur de chaleur 7 peut être une paroi de four ou de réacteur chimique. Un réacteur chimique peut notamment être utilisé pour la production d'hydrogène par thermolyse en utilisant un cycle soufre-iode : voir la présentation « *Sulfur-Iodine Thermochemical Cycle* », P. Pickard, Sandia National Labs, 17 mai 2006. Un cycle oxydes-cérium peut également être mis en œuvre.
- [0188] La [Fig.4] illustre un dispositif 1 de mise en œuvre de réactions de fusion selon l'invention associé à un dispositif 50 de production d'hydrogène par thermolyse.
- [0189] La chaleur produite par les réactions de fusion est transportée par le matériau conducteur de chaleur 7 dans les réacteurs 51, 52, 53 dont les températures internes sont respectivement maintenues à 830 °C, 650 °C et 120 °C. Les réacteurs 51 et 52 d'une part et 52 et 53 d'autre part partagent respectivement une paroi, les autres parois des réacteurs étant formées par le matériau conducteur de chaleur 7.
- [0190] En fonctionnement, de l'eau H₂O est introduite dans le réacteur 53. Mélangée à du gaz iode I₂ et à du dioxyde de soufre SO₂, l'eau réagit pour produire de l'iodure d'hydrogène HI et d'acide sulfurique H₂SO₆ qui sont ensuite séparés dans le séparateur 63.
- [0191] Après séparation, l'iodure d'hydrogène est injecté dans le réacteur 52 et l'acide sulfurique dans le réacteur 51.
- [0192] Dans le réacteur 52, l'iodure d'hydrogène réagit pour produire du dihydrogène H₂ et de l'iode I₂. Le dihydrogène et l'iode sont séparés dans le séparateur 62. Après séparation, le dihydrogène est évacué et l'iode est réintroduit dans le réacteur 53.
- [0193] Dans le réacteur 51, l'acide sulfurique réagit pour produire du dioxyde de soufre SO₂, de l'eau H₂O et du dioxygène O₂. Un séparateur 61 est prévu pour séparer les produits de la réaction. Le dioxyde de soufre est ensuite injecté dans le réacteur 53 et le dioxygène évacué.
- [0194] Le matériau conducteur de chaleur 7 peut aussi être relié à une centrale de chauffage ou à un échangeur thermique couplé à une turbine pour générer de l'électricité ou une énergie mécanique, formant ainsi un moteur.

Soudure

- [0195] Selon une variante avantageuse, la cible et/ou le matériau conducteur de chaleur est, ou sont agencés en contact thermique avec, une surface à souder ou un apport de

matière d'une imprimante 3D, la chaleur générée par les réactions de fusion et transmise par la cible et/ou le matériau conducteur de chaleur permettant de réaliser une soudure.

Perforation

[0196] Selon une autre variante possible de l'invention, la chaleur dégagée par la réaction nucléaire, par exemple entre de l'hydrogène, du deutérium et l'hélium 3 ou 4 ionisé et un métal tel que l'aluminium, le vanadium, le chrome, le manganèse, le fer, le nickel, le cuivre, le zinc, l'argent, l'étain, le tungstène ou le platine, peut permettre de perforer des surfaces ou modules métalliques de fentes fines ou de trous notamment d'épaisseur ou de sections de l'ordre de deux micromètres, pour former des guides d'ondes permettant par exemple, si ces trous se rejoignent pour former des jointures, de faire s'ajouter plusieurs ondes électromagnétiques par exemple issues de lasers synchronisés tels que des VCSEL (lasers à cavité verticale émettant par la surface) pour qu'elles puissent former une onde électromagnétique de puissance supérieure aux puissances auxquelles les cristaux ou verres peuvent résister (typiquement au-delà de 10^{16} W/cm²) ; de tels modules pouvant être juxtaposés les uns aux autres après avoir été percés ; ou pour faire passer la lumière à travers des plaques métalliques épaisses, en particulier si les parois de l'intérieur desdits trous sont recouverts de fines couches de diélectriques puis remplies d'un diélectrique d'indice de réfraction supérieure à l'indice de réfraction du matériau déposé sur les parois, et ainsi rendre des parois métalliques translucides à la lumière, ou de permettre de réaliser des écrans d'affichage métalliques.

Création de terres rares

[0197] Le dispositif de mise en œuvre de réactions de fusion selon l'invention peut être utilisé pour produire des terres rares ou des éléments rares, tels que l'or ou le platine qui peut être produit à partir de béryllium en tant qu'isotope source et de sodium en tant qu'isotope cible. Dans ce cas, les réactions de fusion peuvent être endothermique, et le dispositif peut ne pas comporter de générateur d'électricité à partir de la chaleur produite mais un simple dispositif de refroidissement des matériaux cibles et produit.

Turboréacteur et statoréacteur

[0198] Avantagusement, la chaleur produite par les réactions de fusion peut servir à chauffer et dilater de l'air et ainsi produire une poussée, de manière similaire à un moteur à réaction. La source peut être du fluor 19, accélérés par exemple à 1,5 MeV, réagissant sur l'azote 14 et l'oxygène 16 de l'air ainsi que sur du carbone 12 disposé, par exemple sur une épaisseur de 1,5cm, sur la paroi interne du turbo/statoréacteur. Alternativement encore, la source peut être du lithium 7, avantagusement chauffé au-dessus de son point d'ébullition qui est d'environ 1342 °C pour son ionisation avant

d'être accéléré à une énergie par exemple de l'ordre de 2 MeV, pour réagir avec l'azote 14 et l'oxygène 16 de l'air, puis le fer, de préférence du fer 56, disposé sur les parois internes du réacteur, par exemple sur une épaisseur comprise entre 2 et 3 cm. La chaleur produite par effet Bragg et par la réaction nucléaire, peut être avantageusement utilisée en partie pour alimenter en chaleur un combiné cycle iode-souffre-pile SOC, ou bien la régénération de l'oxyde de zinc servant à la génération d'électricité comme décrit par la suite. Alternativement l'électricité peut être fournie par un générateur électrique indépendant tel qu'un alternateur mu par un moteur thermique ou bien une pile à combustible ou une batterie par exemple Li-ion.

[0199] Un réacteur selon l'invention est illustré en [Fig.6], qui a déjà été commentée.

Chauffage de l'eau

[0200] Le procédé décrit peut aussi être utilisé pour chauffer de l'eau, sous forme liquide ou gazeuse. On peut par exemple utiliser une source de fluor 19 ou sodium 23 accélérée à 1,5 MeV pour réagir avec l'oxygène 16 et le protium pour former avec le fluor du chlore 35, du néon 20, et avec le sodium du magnésium 24 et du potassium 39.

Production d'oléfines

[0201] La chaleur de fusion et d'effet Bragg est avantageusement utilisée pour convertir en présence par exemple de platine, palladium, rhodium, ruthénium, iridium, osmium, un alcane telle que du butane en alcène, et donc de butane en butène. Alternativement on peut utiliser la fusion nucléaire sur l'alcane pour la chauffer avec pour source par exemple de fluor 19 ou du Sodium 23 accélérés à 1,5 MeV pour réagir avec le carbone 12 et le protium pour former respectivement, avec le fluor du phosphore 31 et du néon 20, et avec le sodium 23, du chrome 35 et du magnésium 24.

Réduction du CO2

[0202] La chaleur de fusion et d'effet Bragg est avantageusement utilisée pour transformer du dioxyde de carbone mélangé à du dihydrogène en méthane et en eau ou bien pour transformer du méthane en carbone et dihydrogène selon les réactions suivantes :

[0203] $\text{CO}_2 + 4\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$ à 30 atm et 400°C en présence de nickel

[0204] $\text{CH}_4 \rightarrow \text{C} + 2\text{H}_2$ si le méthane est chauffé à 1200°C en présence des diamants sur lesquels le carbone se dépose pour accroître sa taille

[0205] Le dioxyde de carbone étant par exemple chauffé par une réaction de fusion avec du tritium ou du lithium 7 de préférence porté à ébullition à 1330°C.

[0206] Le méthane étant chauffé par exemple par une réaction nucléaire de fusion utilisant du deutérium pour ions sources.

[0207] La chaleur produite servant à apporter l'énergie aux réaction endothermiques et à générer de l'électricité et de la chaleur par l'intermédiaire par exemple d'une turbine.

Recyclage des plastiques

[0208] Dans une autre variante, la chambre de réaction peut servir de réacteur dans lequel l'oxygène de l'air a été retiré et dans lequel des déchets plastiques, notamment du polystyrène, polyéthylène, polypropylène, polytéréphtalate sont amenés, de préférence de manière continue sur un tapis roulant dans le réacteur sous le faisceau d'ions le fluor 19 étant utilisé en source pour fusionner avec l'azote, l'hydrogène, le carbone ou l'oxygène, pour, en plus de la chaleur du refroidissement des ions, chauffer l'intérieur du réacteur dans lequel on aura placé avantageusement un catalyseur tel que du Zéolithe traité thermiquement et à l'acide [Miandad, R., Rehan, M., Barakat, M. A., Aburizaiza, A. S., Khan, H., Ismail, I. M., ... & Nizami, A. S. (2019). Catalytic pyrolysis of plastic waste: moving toward pyrolysis based biorefineries. *Frontiers in Energy Research*, 7, 27.], pour décomposer les dits plastiques, en essences à environ 450°C, l'excès de chaleur étant évacué par l'intermédiaire d'une turbine à vapeur générant de l'électricité dont une partie est utilisée pour accélérer les ions sources. Alternativement, l'ion source utilisé peut être du sodium 23, notamment si l'azote a été retiré de l'atmosphère entourant le plastique.

Fabrication du ciment

[0209] Le chauffage de l'argile et du calcaire peut être effectué par un flux d'azote chauffé par réaction nucléaire, par exemple du brome 81 ou du magnésium 25 de préférence porté à une température où celui-ci est à l'état gazeux avant son ionisation, accélérés respectivement à 3,5 Mev et 2 Mev étant utilisé en matériau source sur l'azote, pour former du molybdène et du potassium et une partie de la chaleur produite pouvant être utilisée pour produire l'électricité nécessaire à l'accélération des ions, par exemple en utilisant le cycle Iode-Soufre.

Fabrication du fer

[0210] Le chauffage par fusion peut être utilisé pour régénérer du monoxyde de carbone à partir de dioxyde de carbone comme décrit plus haut, le dioxyde de carbone étant le coproduit de la réduction de l'oxyde ferrique par le monoxyde de carbone à 2000°C ($\text{Fe}_2\text{O}_3 + 3 \text{CO} \rightarrow 2 \text{Fe} + 3 \text{CO}_2$). Du dihydrogène produit par exemple par le procédé iode-soufre décrit plus haut peut aussi être mélangé au monoxyde de carbone pour que la réduction de l'oxyde ferrique se fasse selon la réaction : $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CO} + 2 \text{H}_2 \rightarrow 2 \text{Fe} + \text{CO}_2 + 2 \text{H}_2\text{O}$

Production d'électricité

[0211] Le dispositif selon l'invention peut permettre de produire de l'électricité en le combinant à un dispositif de production d'électricité à partir de la chaleur produite par les réactions de fusion nucléaire et récupérée par le matériau conducteur de chaleur. L'électricité peut par exemple être produite par pile au zinc, ou par production d'hydrogène ensuite consommé dans une pile à hydrogène, ou encore par exemple à

l'aide d'une turbine alimentée par de la vapeur d'eau et connectée à un alternateur.

[0212] L'électricité produite est avantageusement utilisée pour alimenter au moins partiellement l'accélérateur d'ions et/ou le système d'ionisation.

[0213] Pile au zinc

[0214] On peut par exemple produire de l'électricité en régénérant de l'oxyde de zinc en zinc puis en utilisant le zinc comme électrode d'une pile zinc-air. Le rendement énergétique est limité d'une part par le rendement de la pile zinc-air qui, opérant à 1,4 V pour une tension théorique de 1,65 V est de l'ordre de 84%, et d'autre part par le rendement de régénération du zinc qui est :

[0215] - de 100% par calcination de l'oxyde de zinc en Zn et oxygène ($\text{ZnO} \rightarrow \text{Zn} + 1/2 \text{O}_2$) à 1727°C, le dioxygène pouvant être séparé du zinc par exemple en portant le mélange gazeux à une pression telle que la pression partielle du zinc gazeux atteigne la pression à laquelle le dit zinc gazeux devient liquide soit environ 30GPa,

[0216] - ou de 85% par hydrogénation de l'oxyde de zinc si l'hydrogène est produit par le cycle soufre-iode.

[0217] On peut aussi utiliser à la place d'une pile zinc-air toute pile décrite dans la demande de brevet du même inventeur déposée le même jour que la présente demande et dont le titre est « Conversion d'énergie thermique en énergie électrique par une pile à électrode liquide et électrolyte solide ».

[0218] On peut aussi utiliser la chaleur produite pour séparer les métaux d'un alliage ayant servi à la production d'électricité comme décrit dans le brevet US 3245836 A.

[0219] Hydrogénation de l'oxyde de zinc

[0220] Du protium peut être utilisé comme source et du tritium pour cible, le protium étant accéléré à 30 MeV. La chaleur produite par la fusion, peut être utilisée pour la régénération du zinc à partir d'oxyde de zinc produit par une pile Daniel dont une partie de l'électricité qu'elle produit sert à accélérer les ions source. La réaction chimique est :

[0221] $\text{ZnO} + \text{H}_2 \rightarrow \text{Zn} + \text{H}_2\text{O}$

[0222] Cette réaction peut se faire à 1000 °C dans un mélange de 87% de di-azote, 13% d'hydrogène mais avantageusement sans di-azote et de préférence en l'absence d'eau [voir l'article Lew, S., Sarofim, A. F., & Flytzani-Stephanopoulos, M. (1992). *The reduction of zinc titanate and zinc oxide solids*. Chemical engineering science, 47(6), 1421-1431]. L'oxyde de zinc peut provenir d'une pile à combustible de type zinc-air permettant ainsi de recharger le combustible d'une telle pile à combustible qui peut par ailleurs éventuellement être rechargeable par électrolyse. L'hydrogène peut aussi, par exemple être chauffé par fusion nucléaire avec du deutérium qui produit de l'hélium. Le zinc, utilisé avec de l'hydrogène peut servir en partie pour produire l'électricité nécessaire à l'accélération des ions permettant la réaction nucléaire, et la chaleur produite en excès pouvant servir à générer de l'hydrogène par le cycle iode soufre.

- [0223] Réduction de l'oxyde de zinc par Carbone et monoxyde de carbone
- [0224] Alternativement, on peut régénérer le zinc par réduction avec du carbone à 1280 °C-1320 °C ou avec du monoxyde de carbone à 950 °C, les deux réactions étant endothermiques et produisant du zinc et du dioxyde de carbone, le dioxyde de carbone étant par exemple régénéré en carbone et oxygène par électrolyse à haute température.
- [0225] Pile à hydrogène
- [0226] On peut encore générer de l'électricité en produisant de l'hydrogène, par exemple par le cycle iode-soufre, puis en utilisant cet hydrogène dans une pile à combustible. Ces piles ont un rendement proche de 60%. On peut avantageusement utiliser pour pile à combustible une pile de type SOFC dont on peut récupérer la chaleur dégagée pour co-alimenter en chaleur le dispositif de production d'hydrogène permettant un rendement électricité/ chaleur de 77% voire 79.5% si un cycle de conversion de basse chaleur est utilisé avec un rendement de 10% ou plus, tel que le cycle de Rankine.
- [0227] En utilisant une chaleur produite par avec pour élément source du protium et cible du tritium dégageant, par exemple 161 joules pour 100 joules d'énergie d'accélération des ions, et un rendement de conversion chaleur électricité de 84% comme décrit plus haut, le taux d'utilisation de la chaleur produite par fusion est de l'ordre de $(1,61 \times 0.84 - 1) / 0,61 = 57\%$.
- [0228] Cycle soufre-iode
- [0229] Le cycle Soufre-Iode permet, à l'aide de chaleur élevée de produire de l'hydrogène tout en produisant un peu de chaleur à 120°C pour une perte énergétique de chaleur estimée par l'inventeur à environ 15% ; la réaction $I_2 + SO_2 + 2 H_2O \rightarrow 2 HI + H_2SO_4$ dégageant 15% de la chaleur nécessaire aux deux réactions endothermiques : $2 H_2SO_4 \rightarrow 2 SO_2 + 2 H_2O + O_2$ et $2 HI \rightarrow I_2 + H_2$.
- [0230] La chaleur issue de la réaction exothermique du soufre-iode peut être avantageusement utilisée dans un cycle de Rankine organique permettant de transformer 10% de cette énergie en énergie électrique, portant alors le rendement de la conversion énergétique à environ 79%.
- [0231] Régénération des électrodes et électrolytes d'une batterie au plomb
- [0232] Le dispositif selon l'invention peut servir à produire de l'électricité par la décharge d'une batterie au plomb dont les électrodes et électrolytes sont régénérées par des réactions chimiques endothermiques dont la chaleur est fournie par le dispositif selon l'invention.
- [0233] La réaction chimique globale ayant lieu lors de la décharge d'une batterie au plomb est :
- [0234] $Pb_{(s)} + PbO_{2(s)} + 2H_2SO_{4(aq)} \rightarrow 2PbSO_{4(s)} + 2H_2O_{(l)}$
- [0235] La chaleur peut être utilisée pour décomposer le sulfate de plomb $PbSO_4$ à 1000°C selon la réaction :

- [0236] $\text{PbSO}_4 \rightarrow \text{PbO} + \text{SO}_3$ à 1000 °C
- [0237] Puis, par la suite à réduire l'oxyde de plomb selon la réaction :
- [0238] $\text{PbO} + \text{CO} \rightarrow \text{Pb} + \text{CO}_2$ à 1200 °C
- [0239] Le monoxyde de carbone CO est régénéré à partir du dioxyde de carbone CO_2 par électrolyse à haute température.
- [0240] Le trioxyde de soufre SO_3 pouvant réagir de manière exothermique avec de l'eau H_2O pour former de l'acide sulfurique H_2SO_4 .
- [0241] Régénération des électrodes et électrolytes d'une pile alcaline
- [0242] Le dispositif selon l'invention peut être utilisé pour produire de l'électricité par la décharge d'une pile alcaline dont les électrodes sont régénérées par des réactions chimiques endothermiques dont la chaleur est fournie par le dispositif selon l'invention.
- [0243] La réaction chimique globale ayant lieu lors de la décharge d'une pile alcaline est :
- [0244] $\text{Zn (s)} + 2\text{MnO}_{2(\text{s})} + \text{H}_2\text{O (l)} \rightarrow 2\text{MnO(OH)(s)} + \text{ZnO (s)}$
- [0245] La chaleur générée par le dispositif selon l'invention sert à permettre les réactions suivantes :
- [0246] $\text{ZnO} \rightarrow \text{Zn} + 1/2 \text{O}_2$ à 1727°C, le zinc et l'oxygène étant séparés par exemple à haute pression comme décrit précédemment, et
- [0247] $\text{MnO(OH)} \rightarrow \text{MnO}_2 + 1/2 \text{H}_2$ à 300°C, le MnO_2 étant solide à 300°C tandis que le dihydrogène est gazeux.
- [0248] Pile SOFC
- [0249] Le dispositif selon l'invention peut également être utilisé en combinaison avec une pile SOFC. La pile SOFC permet, à partir d'hydrogène, de produire de l'électricité et de la chaleur à haute température, avec un rendement de production électrique de 60% et de 40% pour la production de chaleur [voir l'article Alaswad, A., Baroutaji, A., Rezk, A., Ramadan, M., & Olabi, A. G. (2020). Advances in Solid Oxide Fuel Cell Materials.].
- [0250] L'invention n'est pas limitée aux exemples décrits précédemment. En particulier, les dispositifs et procédés cités ou illustrés peuvent être combinés différemment entre eux pour former d'autres variantes non illustrées.

Revendications

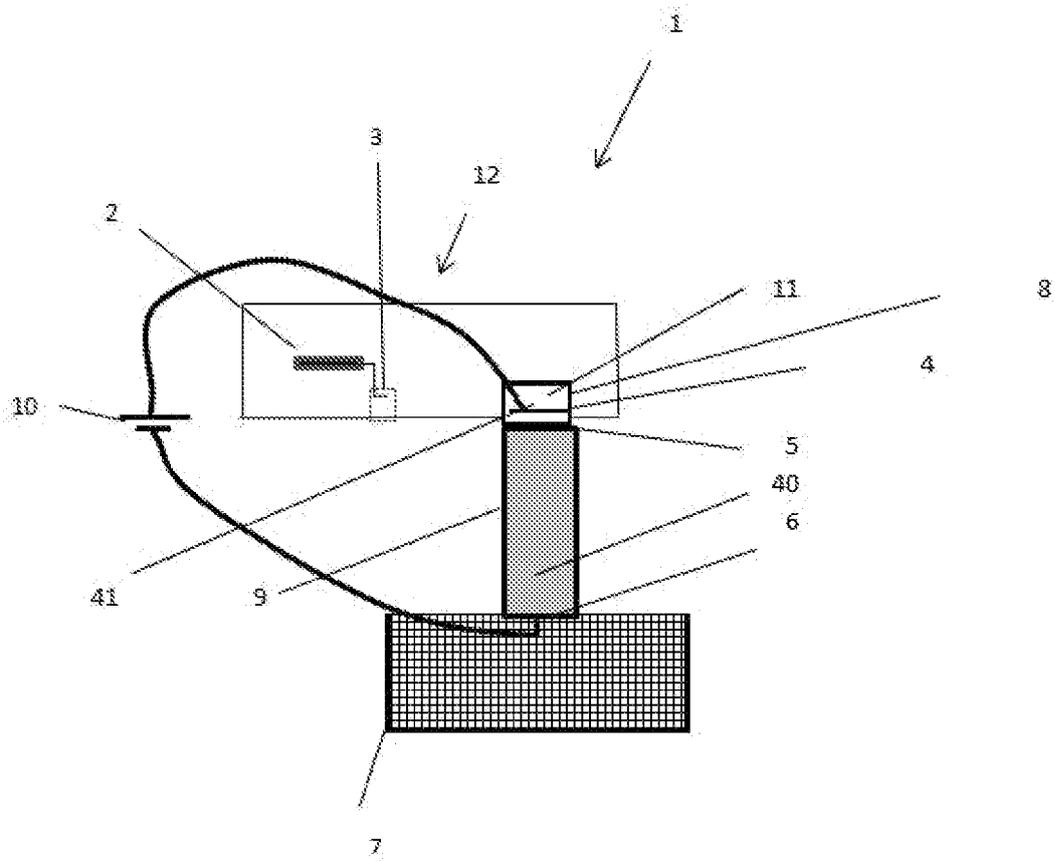
- [Revendication 1] Dispositif (1) de mise en œuvre de réactions de fusion nucléaire, comportant :
- une enceinte (9) configurée pour contenir un matériau source (11) et une cible (6),
 - un système (12) d'ionisation au moins partielle du matériau source,
 - un accélérateur d'ions (10) configuré pour accélérer le matériau source ionisé vers la cible de manière à provoquer la fusion des noyaux atomiques du matériau source ionisé avec des noyaux atomiques de la cible,
 - au moins un matériau de récupération de chaleur (7) en contact thermique avec la cible, le matériau de récupération de chaleur étant un matériau conducteur de chaleur, de préférence de l'aluminium, du cuivre ou des nanotubes de carbone, et/ou un matériau caloporteur, notamment de l'air, de l'eau ou un métal liquide, et/ou un matériau absorbeur de chaleur absorbant de préférence la chaleur par le biais d'une réaction chimique ou d'un changement de phase endothermique, le matériau de récupération de chaleur comportant optionnellement des canaux de circulation d'un fluide caloporteur,
 - un système de conversion de l'énergie thermique récupérée par le matériau de récupération de chaleur en énergie électrique configuré pour alimenter au moins en partie l'accélérateur d'ions et/ou le système d'ionisation.
- [Revendication 2] Dispositif selon la revendication précédente, le système d'ionisation du matériau source comportant :
- un laser (2),
 - un guide d'onde d'entrée (21) configuré pour guider la lumière émise par le laser vers une entrée optique (32) de l'enceinte, l'entrée optique étant configurée pour permettre l'illumination du matériau source par la lumière émise.
- [Revendication 3] Dispositif selon la revendication précédente, comportant en outre un guide d'onde de sortie (34) configuré pour guider une lumière amplifiée non absorbée par le matériau source vers l'entrée optique de l'enceinte à partir d'une sortie optique (33) de l'enceinte.
- [Revendication 4] Dispositif selon l'une des revendications 2 ou 3, le système d'ionisation comportant en outre un concentrateur d'onde configuré pour superposer une pluralité de cycles de la lumière émise par le laser de sorte à

- augmenter la puissance instantanée de la lumière émise.
- [Revendication 5] Dispositif selon l'une des revendications 2 à 4, l'enceinte comportant un support réalisé en un matériau transparent à la lumière émise par le laser et configuré pour supporter un matériau source sous forme solide.
- [Revendication 6] Dispositif selon l'une des revendications 2 à 5, les guides d'onde d'entrée et de sortie étant des fibres optiques, l'entrée optique et la sortie optique de l'enceinte comportant chacune de préférence une lentille et une lame anti-reflet.
- [Revendication 7] Dispositif selon l'une des revendications précédentes, la cible étant constituée de deutérium ou de tritium et le matériau source n'étant pas du deutérium, ou la cible étant constituée de deutérium et le matériau source n'étant pas du tritium.
- [Revendication 8] Dispositif selon l'une des revendications précédentes, l'accélérateur d'ions comprenant un générateur de haute tension (10), relié électriquement à une première électrode (4) agencée dans l'enceinte, de préférence à une première extrémité de l'enceinte, et à une deuxième électrode, la deuxième électrode et la cible étant agencées dans l'enceinte de préférence à une deuxième extrémité de l'enceinte opposée à la première extrémité, le générateur et les première et deuxième électrodes étant configurés pour générer un champ électrique permettant d'accélérer le matériau source ionisé vers la cible de manière à provoquer la fusion des noyaux atomiques du matériau source ionisé avec des noyaux atomiques de la cible.
- [Revendication 9] Dispositif selon l'une des revendications précédentes, le système de conversion de l'énergie thermique en énergie électrique étant choisi parmi une pile au zinc ou une pile à hydrogène associée à un système de production d'hydrogène à partir de l'énergie thermique.
- [Revendication 10] Dispositif selon l'une des revendications précédentes, l'enceinte comportant une entrée de gaz et une sortie de gaz configurées pour permettre la circulation d'un matériau source sous forme gazeuse entre l'entrée de gaz et la sortie de gaz.
- [Revendication 11] Dispositif selon l'une des revendications précédentes en combinaison avec la revendication 8, l'enceinte comportant une membrane (5) perméable au matériau source ionisé et imperméable au matériau source neutre et agencée entre les première et deuxième électrodes, la membrane étant de préférence constituée d'une pluralité de couches de nitrure de bore hexagonal.

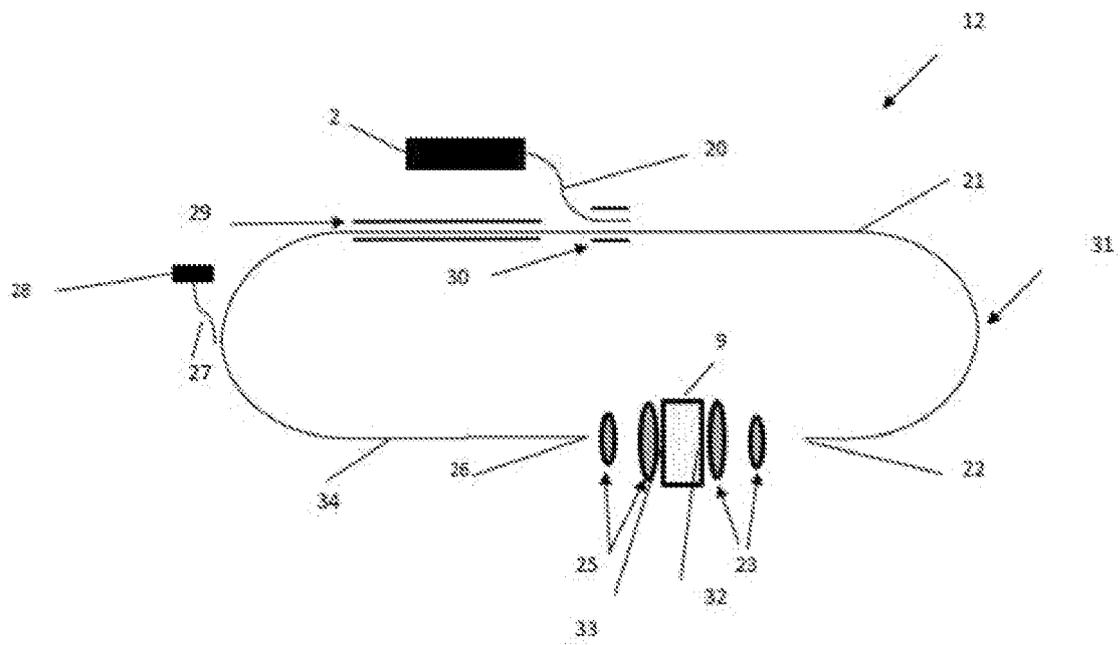
- [Revendication 12] Dispositif selon l'une des revendications précédentes, comportant une bobine (8) agencée autour de l'enceinte, la bobine étant configurée pour générer un champ magnétique d'axe parallèle au champ électrique d'accélération.
- [Revendication 13] Dispositif selon l'une des revendications précédentes, la paroi interne de l'enceinte étant au moins partiellement recouverte d'un matériau diélectrique.
- [Revendication 14] Dispositif selon l'une des revendications précédentes en combinaison avec la revendication 8, comportant une électrode intermédiaire (14) agencée entre la première électrode et la cible et reliée à un deuxième générateur connecté à la deuxième électrode, l'électrode intermédiaire étant constituée d'une grille ou d'une membrane conductrice, de préférence réalisée en graphène.
- [Revendication 15] Réacteur (80), pouvant être un turboréacteur ou un statoréacteur, comportant un dispositif selon l'une des revendications précédentes configuré pour introduire le matériau source accéléré (88) dans une enceinte du réacteur de sorte à permettre le chauffage et la dilatation d'un gaz contenu dans l'enceinte du réacteur.
- [Revendication 16] Utilisation d'un dispositif selon l'une des revendications 1 à 14 pour mettre en œuvre la fusion du deutérium en tant que matériau source et du lithium 7 en tant que cible.
- [Revendication 17] Utilisation d'un dispositif selon l'une des revendications 1 à 14 pour la production d'hydrogène par thermolyse à partir du cycle soufre iode, le cycle soufre iode étant alimenté par la chaleur récupérée par le matériau conducteur de chaleur.
- [Revendication 18] Utilisation d'un dispositif selon l'une des revendications 1 à 14 pour réaliser une soudure, dans laquelle la chaleur générée par les réactions de fusion est transmise par la cible et/ou par le matériau conducteur de chaleur à un matériau fusible.
- [Revendication 19] Utilisation d'un dispositif selon l'une des revendications 1 à 14 pour la production de terres rares par fusion du matériau source ionisé avec des noyaux atomiques de la cible et/ou pour convertir une alcane en alcène en utilisant la chaleur générée par le dispositif par des réactions de fusion et par effet Bragg.
- [Revendication 20] Utilisation d'un dispositif selon l'une des revendications 1 à 14 pour produire de la chaleur, la chaleur étant utilisée pour la décomposition de matières plastiques, la régénération d'oxyde de zinc, la fabrication de ciment, le chauffage de l'eau et/ou la réduction du dioxyde de carbone.

- [Revendication 21] Utilisation d'un dispositif selon l'une des revendications 1 à 14 en tant que réacteur chimique pour le chauffage d'un produit chimique permettant une réaction chimique avec le produit chimique, avec ou sans catalyseur, dans l'enceinte contenant le matériau cible.
- [Revendication 22] Utilisation d'un dispositif d'un dispositif selon l'une des revendications 1 à 14 pour la réduction du dioxyde de carbone en carbone et oxygène.
- [Revendication 23] Utilisation d'un dispositif d'un dispositif selon l'une des revendications 1 à 14 pour la régénération du dioxyde de zinc en zinc et oxygène.
- [Revendication 24] Utilisation d'un dispositif d'un dispositif selon l'une des revendications 1 à 14 pour chauffer un gaz, tel que de l'air.

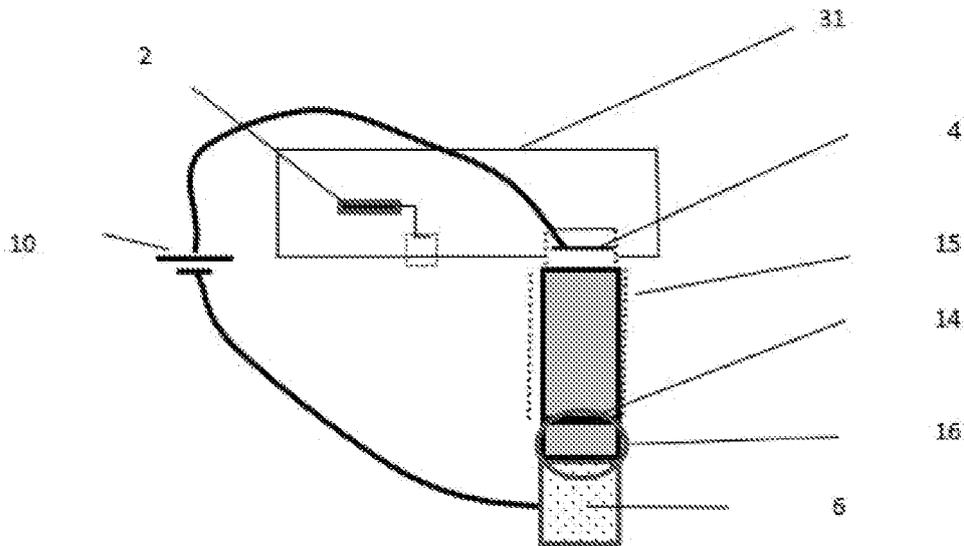
[Fig. 1]



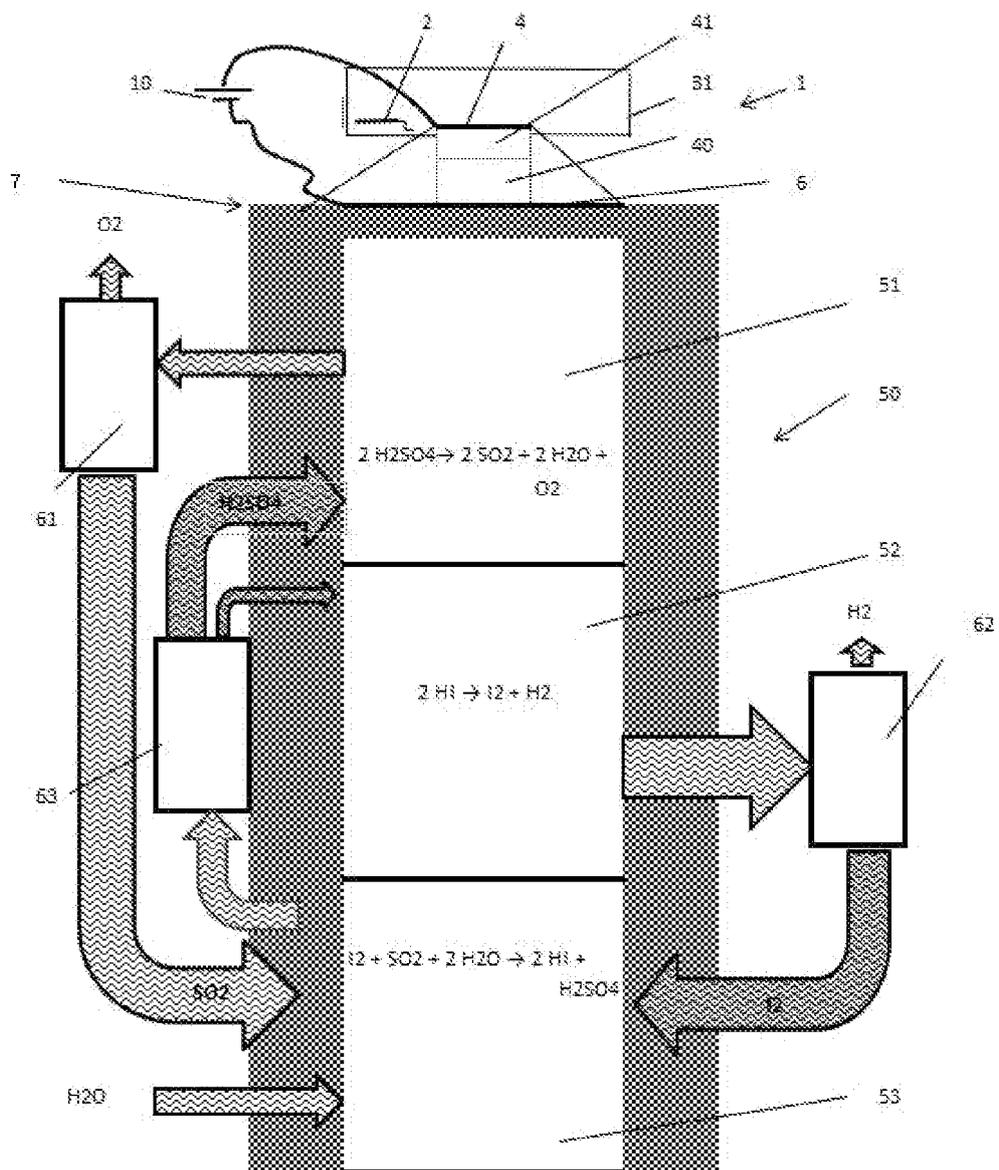
[Fig. 2]



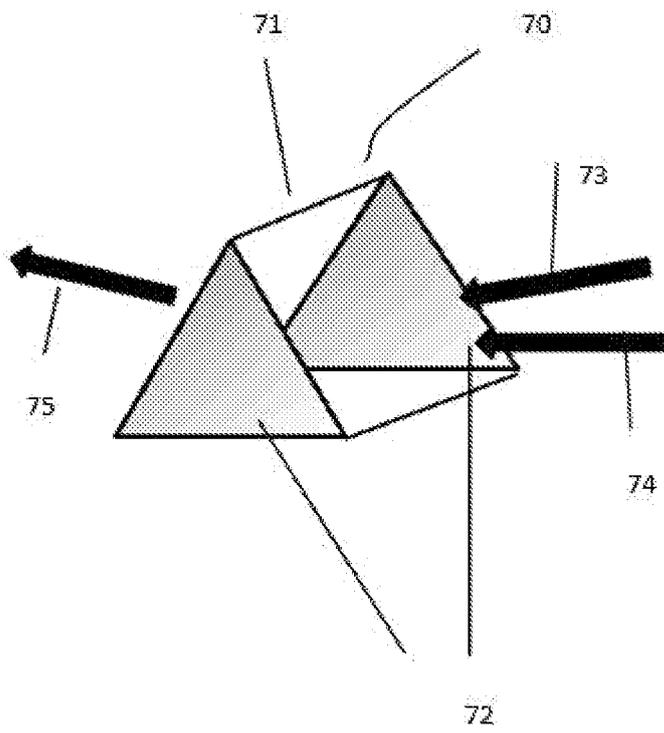
[Fig. 3]



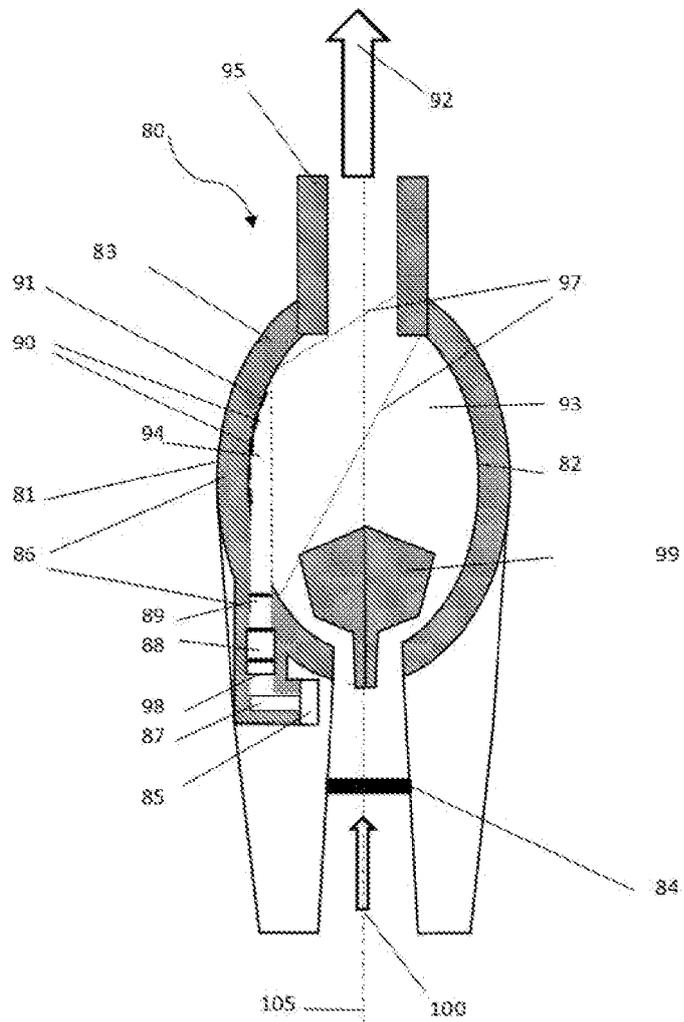
[Fig. 4]



[Fig. 5]



[Fig. 6]



[Fig. 7]

