



**HAL**  
open science

# Le corium de Fukushima Daiichi : formation, état actuel et R&D en vue de sa récupération

Christophe Journeau, Damien Roulet

## ► To cite this version:

Christophe Journeau, Damien Roulet. Le corium de Fukushima Daiichi : formation, état actuel et R&D en vue de sa récupération. 16ème Congrès Francophone de Techniques Laser pour la mécanique des fluides, CNRS, CentraleSupélec, Université Paris Saclay, IRSN, Sep 2018, Dourdan, France. hal-02098226

**HAL Id: hal-02098226**

**<https://hal.science/hal-02098226v1>**

Submitted on 12 Apr 2019

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Le corium de Fukushima Daiichi: formation, état actuel et R&D en vue de sa récupération

Christophe Journeau<sup>1</sup> et Damien Roulet<sup>2</sup>

<sup>1</sup> CEA, DEN, Cadarache, DTN, SMTA, LEAG, 13108 St Paul lez Durance, France

<sup>2</sup> ONET, ZA les Tomples, 26700 Pierrelatte, France

Email auteur correspondant : christophe.journeau@cea.fr

Le 11 mars 2011, un tsunami de grande amplitude a atteint les cotes japonaises moins d'une heure après le séisme de magnitude 9 de Tohoku et a entraîné un accident grave sur la centrale de Fukushima Daiichi. Les cœurs des tranches 1, 2 et 3 ont fondu et formé un matériau dénommé corium. On pense que ce corium se répartit actuellement entre la cuve du réacteur et le puits de cuve (piédestal). Le gouvernement japonais a décidé le démantèlement de ces centrales accidentées, ce qui implique en particulier la découpe et la récupération du corium. Une équipe française a été chargée de la R&D sur la technologie de découpe laser du corium et ses principaux résultats sont présentés.

## 1 Introduction

Le 11 mars 2011, un tsunami de grande amplitude a atteint les cotes japonaises moins d'une heure après le séisme de magnitude 9 de Tohoku [1]. Le tsunami a atteint sur le site de Fukushima Daiichi une hauteur de 12.4 m au-dessus du niveau moyen de la mer alors que le sol des 4 premières tranches de la centrale se trouve à 9.3 m [2]

La centrale de Fukushima Daiichi est composée de 6 réacteurs à eau bouillante de 460 à 1 100 MW électriques (1 380 à 3293 MW de puissance thermique). Le 11/3/2011, seules les 3 premières tranches étaient en fonctionnement.

Alors que le séisme avait entraîné la défaillance des deux lignes haute tension alimentant la centrale, le tsunami a entraîné l'inondation de tous les groupes électrogènes de secours des tranches 1 à 5. Ceci a entraîné un accident par perte totale des alimentations électriques. De plus les sources froides (prises d'eau de mer pour refroidir le condenseur) ont été rendues inutilisables par le tsunami.

L'accident qui s'en est suivi a entraîné la fusion du combustible des trois réacteurs qui étaient en fonctionnement au moment du séisme. Le mélange ainsi fondu est appelé corium. L'objectif de cet article est de décrire brièvement l'état présent des connaissances sur la formation de ces coriums, sur leur état actuel ainsi que de présenter la R&D menée actuellement en France en vue de sa récupération.

## 2 Formation du corium

Dès la détection du séisme (des accélérations allant jusqu'à 5,5 m/s<sup>2</sup> ont été mesurées [2], soit légèrement plus que l'accélération correspondant au séisme de dimensionnement), les barres d'arrêt d'urgence ont été automatiquement insérées dans les cœurs des trois réacteurs en fonctionnement, entraînant l'arrêt de la réaction nucléaire. Néanmoins, il reste une puissance résiduelle due à la radioactivité du combustible irradié. Pour les tranches 2 et 3 dont la puissance thermique nominale est de 2381 MW, la puissance résiduelle répartie dans la centaine de tonnes de combustible est de l'ordre de 170 MW lors de l'arrêt de la réaction en chaîne, de 30 MW environ 1 h après et d'environ 3 MW un mois après. Un des objectifs majeurs de sûreté durant et après l'accident est d'évacuer cette puissance.

La chaleur résiduelle de la tranche 1 était évacuée par un échangeur (dit condenseur d'isolement) et le refroidissement était régulé en ouvrant et fermant la vanne du circuit menant à cet échangeur. La perte d'alimentation électrique s'est produite lorsque la vanne était fermée, ce qui fait qu'il n'y avait plus de sources froides. Il n'a pas été possible de rouvrir ces vannes. La température du circuit primaire a donc augmenté jusqu'à l'ouverture des soupapes. Au bout de quelques heures, le cœur a été dénoyé et a atteint une température de l'ordre de 1200°C à partir de laquelle la réaction exothermique d'oxydation du zirconium des gaines s'emballe, menant à la fusion du cœur et la formation de corium. Cette oxydation du zirconium par la vapeur d'eau génère aussi de l'hydrogène. La pression dans l'enceinte de confinement

va augmenter à tel point que des fuites sont apparues. Alors que l'atmosphère de l'enceinte des réacteurs à eau bouillante est inertée, les fuites d'un gaz contenant une fraction significative d'hydrogène dans l'air du bâtiment réacteur a entraîné l'explosion hydrogène observée dans le bâtiment du réacteur 1, le 12 mars à 15 :36, soit 25 heures après le séisme.

Les tranches 2 et 3 disposent d'un autre système de sauvegarde, le Reactor Core Isolation Cooling system (RCIC) : une pompe dont la force motrice est fournie, à l'aide d'une turbine, par la vapeur générée par l'accident, prélève l'eau dans un réservoir de l'enceinte de confinement et l'introduit à haute pression dans la cuve [3]. Ce système a permis de retarder la fusion du cœur de quelques jours car il a continué à fonctionner même après l'épuisement de ses batteries servant à piloter le débit. Néanmoins, le refroidissement du cœur s'est arrêté avant la mise en place d'un refroidissement par injection d'eau depuis des camions disposant d'une motopompe. Ceci a entraîné la dégradation du cœur (moins étendue dans la tranche 2 que dans la tranche 3 [4]) et la formation de corium.

Lorsqu'un débit suffisant d'eau (de l'ordre de 10-20 m<sup>3</sup> par heure) ne peut pas refroidir le corium, il va se relocaliser, d'abord au fond de la cuve du réacteur puis en cas de brèche de celle-ci, sur le radier en béton de l'enceinte de confinement. Des calculs ont été menés avec divers codes scénario ([4, 5, 6, 7, 8]) afin de reproduire au mieux les quelques mesures relevées durant l'accident. Ils permettent entre autres d'estimer la nature et la répartition spatiale du corium. Le corium est un mélange présentant des hétérogénéités : la Figure 1 présente, par exemple, la configuration multicouche retenue dans la modélisation du code ASTEC [5, 9] : plusieurs couches de corium fondu existent du fait d'une ségrégation entre phases oxydes et métalliques immiscibles. Pour la tranche 1, la couche inférieure (Magma 1) correspondrait à 22 t d'un mélange constitué principalement de 72% d'acier, 14% d'uranium et 9% de zirconium. La couche centrale (Magma 2) de 61.5 t serait, quant à elle, principalement constituée de 48% d'oxyde d'uranium, 35% d'oxyde de zirconium et 16% d'acier oxydé. La couche supérieure (Magma 3) de 3 t serait, quant à elle, constituée d'un mélange partiellement oxydé d'acier d'uranium et de zirconium. Les flux de chaleurs générés par la radioactivité vont entraîner un percement de la cuve et le versement du corium dans le puits de cuve.

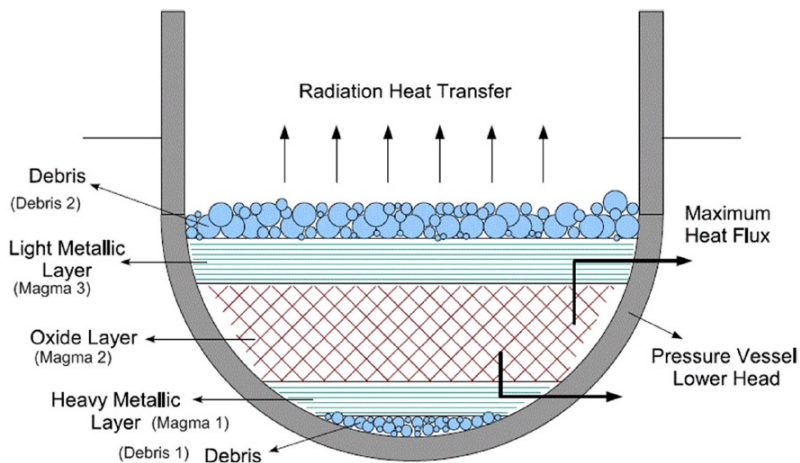


Figure 1: Configuration typique du corium en fond de cuve (tiré de [9])

### 3 Etat du corium

L'exploitant de la centrale de Fukushima Daiichi, TEPCO, a établi (et maintient à jour) des schémas représentatifs de l'état supposé du corium dans les 3 tranches [11]. Ceci est basé d'une part sur la comparaison de calculs scénarios avec les mesures réalisées sur la centrale pendant et après l'accident, sur l'imagerie réalisée à l'aide des muons du rayonnement cosmique [12] et sur les observations réalisées par des robots à l'intérieur des enceintes de confinement.

La Figure 2 montre à titre d'exemple l'état estimatif sur la tranche 2. La majorité du combustible a fondu et s'est relocalisé hors du cœur. Il est néanmoins possible que des assemblages soient restés

intègres à la périphérie du cœur. Une masse significative a été détectée sur les radiographies par muons au niveau du fond de cuve. Ce serait une masse de corium qui pourrait être recouverte et/ou entourée de débris n'ayant pas fondu. Une partie du corium se serait relocalisé à l'extérieur de la cuve : on s'attend à en trouver au niveau des fourreaux de barres de commandes sous la cuve ainsi qu'au contact du béton.

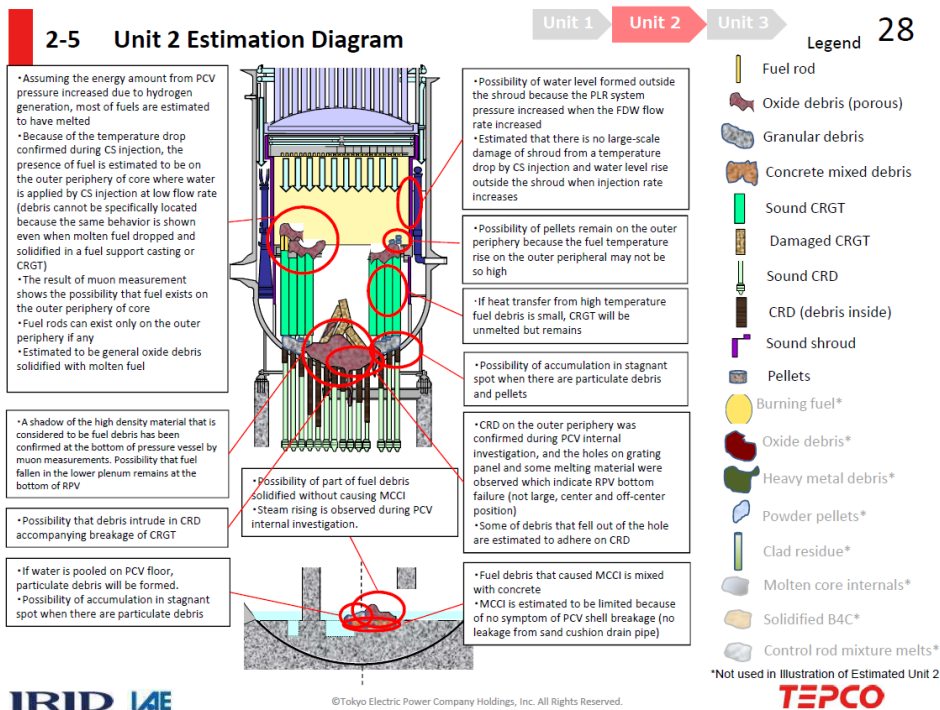


Figure 2: Schéma estimatif de la nature et du positionnement des débris attendus sur la tranche 2 (au 3/7/2017 [11])

La Figure 3 montre des photographies prises par un robot à l'intérieur de l'enceinte de la tranche 3. On observe la présence de débris (ressemblant à des cailloux, vraisemblablement du corium) sur le plancher en béton. Il convient de noter que certaines structures, comme la poignée d'assemblage visible sur la Figure 3 droite, sont visiblement tombées sur ces débris sans fondre.



Figure 3: Photographies du puits de cuve de la tranche 2 [13] (gauche : vue d'ensemble reconstituée – droite : zoom près du mur du puits de cuve)

## 4 Récupération du corium

La présence de grandes quantités de corium dans les réacteurs accidentés de Fukushima représente l'une des sources majeure de risque sur le site de Fukushima [14]. Il est donc primordial de diminuer ce

risque, et pour ce faire il est nécessaire de retirer ce corium et de le stocker dans des conditions stables et maîtrisées

Or, la récupération de ce corium présente un challenge sans précédents pour différentes raisons. D'un côté le corium est hétérogène et comme cela a été expliqué au début de cet article, peut-être dans différentes formes et à différents lieux. D'un autre côté, ce corium est extrêmement radioactif (10 à 1000Gy/h attendus) ce qui nécessite l'intervention de moyen téléopérés pour toutes les opérations ayant lieu à l'intérieur de l'enceinte de confinement. Enfin, l'accès au corium est très complexe, car l'intérieur du bâtiment réacteur est très contaminé, a été détruit en partie durant l'accident, et est partiellement submergé afin de garantir de refroidissement de combustible encore présent.

Plusieurs scénarios sont à l'étude afin de récupérer ce corium comme présentés dans la Figure 4, le premier ayant été abandonné récemment car présentant de trop nombreuses incertitudes sur la capacité de rendre étanche l'enceinte de confinement et la tenue du génie civil résultante. Les scénarios b. et c. sont toujours à l'étude. Quel que soit le scénario retenu, un sujet fait l'objet de programmes de

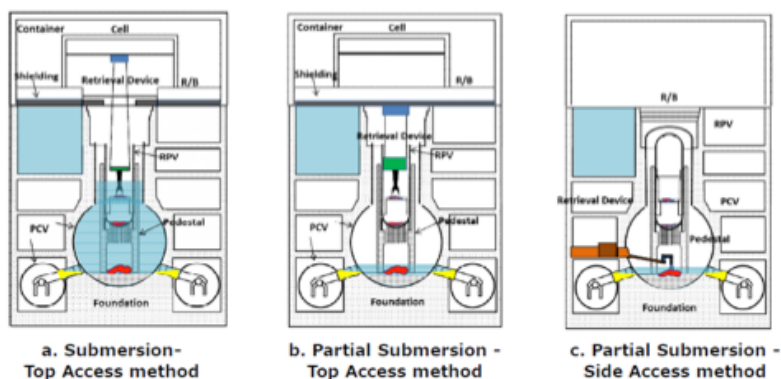


Figure 4: Scénarios de récupération du corium à l'étude (tiré de [11, 14])

R&D depuis 2014, il s'agit de la découpe de ce corium. En effet, ce matériau hétérogène est complexe à découper de par sa composition métallique et céramique, mais aussi de par la nécessité d'effectuer ces coupes en téléopération. Par rapport à la découpe du corium de l'accident de Three Mile Island [15], la présence de corium hors cuve, le mélange de corium avec le béton ainsi que la présence de borures (issus de la dégradation de l'absorbant – carbure de bore) rendent difficiles une simple reprise de l'approche qui avait été mise en œuvre par les américains. Parmi les nombreuses techniques de découpe existantes, la découpe laser est un candidat de choix [16] grâce à ses performances de découpe, sa facilité de mise en œuvre en téléopération, sa robustesse dans ce type d'environnement et sa faible génération d'aérosols en comparaison avec d'autres techniques de découpe thermique [17]. Une équipe française, composée d'ONET Technologies, le CEA et l'IRSN est financée depuis 2014 par le Ministère japonais de l'Economie, du Commerce et de l'Industrie pour le développement de cette technologie appliquée au corium de Fukushima Daiichi.

Cette R&D s'articule autour de 3 axes de recherche complémentaires et interdépendants :

- Le développement de la technologie de découpe laser en elle-même, permettant de mener à bien les opérations de découpe sur ce matériau exotique qu'est le corium et dans les conditions extrême que sont celles de Fukushima.
- L'acquisition de connaissances sur le comportement du corium lors de la découpe laser, notamment la formation des aérosols, des gaz et des scories en tant que déchets secondaires du procédé.
- La collecte des aérosols formés lors de la découpe, qui représente un moyen nécessaire pour mitiger le risque de dispersion de ces aérosols radioactifs dans l'enceinte de confinement.

## Développement de la technologie de découpe laser

La technologie de découpe laser est aujourd'hui largement utilisée dans l'industrie, et depuis peu dans le démantèlement nucléaire par ONET Technologies suite à des développements réalisés par le CEA pour ses propres chantiers de démantèlement en France [16]. Pour l'application de cette technologie au corium de Fukushima, deux verrous technologiques sont à lever, à savoir la découpe laser sous eau et la

découpe laser non-débouchante, c'est-à-dire lorsque le faisceau laser ne traverse pas la pièce à découper comme ce sera le cas sur la découpe de blocs massifs de corium. Ainsi, deux technologies distinctes sont en cours de développement avec la possibilité de travailler à la fois en air et sous eau comme présenté en Figure 5.

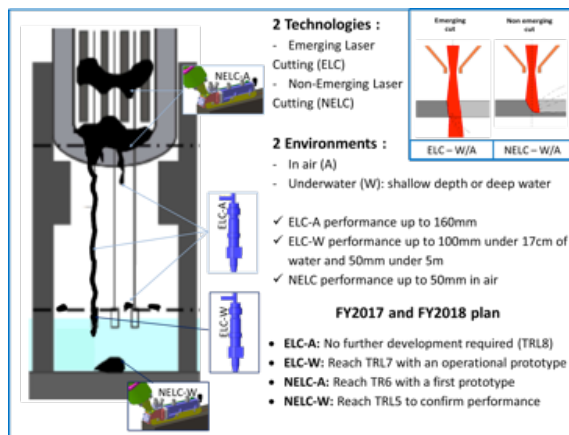


Figure 5: Technologies de découpe laser en cours de développement

Aujourd'hui, les performances [18] de découpe en air sont de 160 mm sur des simulants de corium en découpe débouchante et de 50 mm en découpe non-débouchante (Figure 8). Pour la découpe sous eau, les performances en découpe débouchante sont de 100mm sous faible épaisseur d'eau et 50 mm sous 5 m d'eau.



Figure 6: Technologies de découpe laser en cours de développement

## Connaissances sur le comportement du corium lors de la découpe laser

Le corium étant un matériau assez peu connu, il n'y avait aucune information disponible sur son comportement mécanique lors de la découpe laser, ni sur les déchets secondaires issus de la découpe tels que les aérosols, les gaz, les scories et éventuellement les particules dissoutes en cas de découpe sous eau (Figure 7). Plusieurs simulants représentatif du corium, mais non radioactifs ont donc été fabriqués sur l'installation PLINIUS du CEA à Cadarache [19] et ces simulants ont été découpés par laser puis les déchets secondaires ont pu être analysés afin de connaître leur composition, leur forme, leur taille etc.

Ces résultats ont pu mettre en évidence des aérosols de petite taille (0.1 à 0.2 $\mu$ m pour les modes nominaux [20]), une production très dépendante du type de corium découpé et un phénomène d'agglomération lors des découpes sous eau augmentant ainsi leur taille mais réduisant leur nombre.

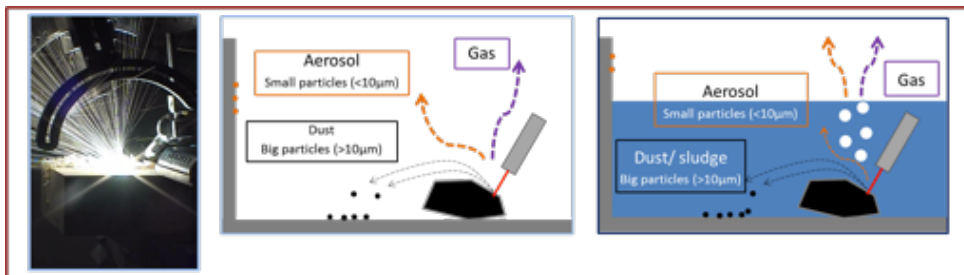


Figure 7: Déchets secondaires émis lors d'une découpe laser en air et sous eau

La composition chimique des aérosols (Figure 8) a également pu mettre en avant la prédominance des espèces non-radioactives, mais étant donné les radioéléments présents dans le corium, ces aérosols contiennent une radioactivité toutefois élevée et nécessitant une collecte au plus proche de leur émission.

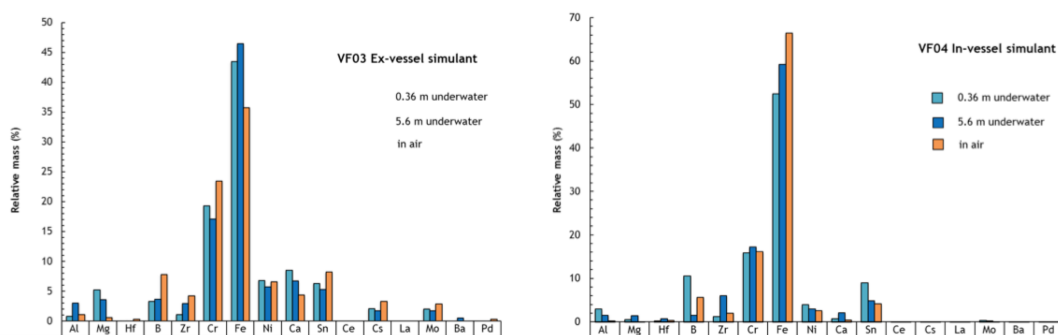


Figure 8: Technologies de découpe laser en cours de développement

## Développement des procédés de collecte des aérosols

Afin de pallier aux risques de dispersion des aérosols de petites tailles dans l'enceinte de confinement, plusieurs technologies sont en cours de développement afin de collecter ces aérosols au plus proche de leur émission. Dans le cadre de la découpe en air, des bouches d'aspirations sont en cours de développement en interface directe avec la tête de découpe laser, afin de capter puis transporter vers un dispositif de filtration l'ensemble des aérosols libérés pendant la découpe. Dans le cadre de la découpe sous eau, une collecte au plus proche de la découpe n'est pas envisageable à cause de la turbulence engendrée par la découpe laser. Une solution d'aspersion par microgouttelettes est en cours de développement, afin de rabattre les aérosols dans l'eau et ainsi les collecter en voie humide. Des essais avec un dispositif de visualisation par laser sont menés en support à ces études

## 5 Conclusions

Les différents développements en cours pour la découpe du corium donnent des résultats très encourageant sur la capacité de la technologie laser à relever le défi de la récupération du corium de Fukushima. Les phases de R&D actuelle vont se poursuivre dans les années à venir avec notamment une décision sur le scénario de récupération du corium prévue en 2019 et les premières opérations de retrait (petite échelle) en 2021 [1].

## References

- [1] A. Carpentier, E.-E. Beaulieu, E. Brézin, J. Friedel, L'accident majeur de Fukushima, Considérations sismiques, nucléaires et médicales, Académie des Sciences, EDP Sciences, Les Ulis, 2012 [
- [2] Atomic Energy Society of Japan, The Fukushima Daiichi Nuclear Accident, Final report of the AESJ Investigation Committee, Springer, Tokyo, 2015.
- [3] S.I. Kim, J.H. Park, K.S. Ha, S.-W. Cho, J.H. Song, Analysis of Fukushima unit 2 accident considering the operating conditions of RCIC system, Nucl. Eng. Des. , 298: 183-191 (2016)
- [4] M. Pellegrini, K. Dolganov, L. E. Herranz, H. Bonneville, D. Luxat, M. Sonnenkalb, J. Ishikawa, J. H. Song, R. O. Gauntt, L. Fernandez Moguel, F. Payot, Y. Nishi, Benchmark Study of the Accident at the Fukushima Daiichi NPS: Best-Estimate Case Comparison, Nucl. Technol., 196(2): 198-210, 2016
- [5] H. Bonneville, A. Luciani, Simulation of the code degradation phase of the Fukushima accidents using the ASTEC code, Nucl. Eng. Des., 272: 261-272, 2014
- [6] R. Gauntt, D. Kalinich, J. Cardoni, J. Phillips, MELCOR Simulation of the Severe Accident at the Fukushima Daiichi Unit 1 Reactor, Nucl. Technol., 186: 161-178, 2014
- [7] H. Suzuki, M. Naitoh, A. Takahashi, M. Pellegrini, H. Okada, Analysis of Accident Progression with the SAMPSON Code in Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Unit 2, Nucl. Technol., 186: 255-262, 2014
- [8] Y. Yamanaka, S. Mizokami, M. Watanabe, T. Honda, Update of the first TEPCO MAAP Accident Analysis of Units 1, 2 and 3 at Fukushima Daiichi Nuclear Power Station, Nucl. Technol., 186: 263-279
- [9] H. Bonneville, L. Carenini, M. Barrachin, Core Melt Composition at Fukushima Daiichi : results of Transient Simulations with ASTEC, Nucl. Technol., 196: 489-498, 2016.
- [10] K. Robb, M.W. Francis, M. T. Farmer, Ex-Vessel Core Melt Modeling Comparison between MELTSPREAD-CORQUENCH and MELCOR 2.1, Rapport Oak Ridge National Lab ORNL/TM-2014/1, 2014.
- [11] S. Mizokami, Estimation of current status inside RPV and PCV at Fukushima Daiichi NPS, 2nd Int. Forum on Decommissioning of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station, Iwaki, July 2017, [http://ndf-forum.com/2nd/ref/d2\\\_mizokami\\\_en.pdf](http://ndf-forum.com/2nd/ref/d2\_mizokami\_en.pdf)
- [12] TEPCO, IRID, Locating Fuel debris inside the Unit 2 Reactor using a Muon Measurement Technology at Fukushima Daiichi Nuclear Power Station, TEPCO handouts, [http://www.tepco.co.jp/en/nu/fukushima-np/handouts/2016/images/handouts\\\_160728\\\_01-e.pdf](http://www.tepco.co.jp/en/nu/fukushima-np/handouts/2016/images/handouts\_160728\_01-e.pdf), July 2016.
- [13] TEPCO, Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Unit 2 Primary Containment Vessel Internal Investigation, TEPCO handouts, [http://www.tepco.co.jp/en/nu/fukushima-np/handouts/2018/images/handouts\\\_180426\\\_02-e.pdf](http://www.tepco.co.jp/en/nu/fukushima-np/handouts/2018/images/handouts\_180426\_02-e.pdf), April 2018
- [14] NDF, Technical Strategic Plan 2017 for Decommissioning of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station of Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc., [http://www.dd.ndf.go.jp/en/strategic-plan/book/20171005\\\_SP2017eFT.pdf](http://www.dd.ndf.go.jp/en/strategic-plan/book/20171005\_SP2017eFT.pdf)
- [15] B.A. Osif, A.J. Baratta, T.W. Conkling, TMI 25 years later, The Three Mile Island Nuclear Power Plant Accident and Its Impact, Pennsylvania State University Press, University Park, PA, 2004.
- [16] D. Roulet, C. Chagnot, E. Porcheron, LASER Cutting solutions for Nuclear Decommissioning, Waste Management Symposia, Phoenix, March 2018
- [17] Pilot, G., Fauvel, S., Gosse, X., de Dinechin, G., Vernhet, D. (2008). Measurement of secondary emissions during laser cutting of steel equipments. Nucl. Eng. Des. 238: 2124–2134.
- [18] D. Roulet, C. Georges, C. Chagnot, C. Journeau, E. Porcheron, Development of Laser Cutting and Dust & Fumes Collection technologies for Fuel Debris Retrieval, 2nd International Forum on the Decommissioning of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station, July 2017



- [19] Journeau C., Monneris J., Tormos B., Brissonneau L., Excoffier E., Testud V., Chagnot C., Roulet D., Fabricating Fukushima Daiichi in-vessel and ex-vessel fuel debris simulants for the development and qualification of laser cutting technique, Proc. ERMSAR-2017 (Eur. Rev. Mtg Sev. Accident Res.), 2017 May 16-18. Warsaw, Poland.
- [20] Porcheron, E., Peillon, S., Gelain, T., Chagnot, C., Journeau, C., Roulet, D., Analysis of aerosol emission and dispersion during the laser cutting of Fukushima fuel debris simulants, Int. Conf. On Nuclear Engineering, ICONE, Londres, 2018.
- [21] E. Porcheron, Y. Leblois, C. Chagnot, C. Journeau, D. Roulet, Récupération du corium des réacteurs de Fukushima Daiichi : efficacité d'épuration des aérosols produits lors de la découpe au laser sous eau de simulants du corium, Congrès Francophone de Techniques Laser, CFTL 2018, Dourdan, Septembre 2018.
- [22] METI, Mid-and-Long-Term Roadmap towards the Decommissioning of TEPCO's Fukushima Daiichi Nuclear Power Station [http://www.meti.go.jp/english/earthquake/nuclear/decommissioning/pdf/20170926\\_01a.pdf](http://www.meti.go.jp/english/earthquake/nuclear/decommissioning/pdf/20170926_01a.pdf), Septembre 2017.