

2013年12月1日

テルル化カドミウム(CdTe)太陽光発電システムの国内大災害発生時の環境リスク評価

東京大学 准教授 松野泰也

1. 本報告書の目的

本報告書の目的は、テルル化カドミウム（以下 CdTe と記す）太陽光発電システムの日本国内で発生する大災害時の環境リスク評価をまとめることにある。地震、津波およびそれらにより誘発される火災は、多くの日本人が懸念する災害である。従って、これらの災害により引き起こされる、CdTe 太陽光発電システムの潜在的環境リスクを検討し、リスクを低減する方策を明確にすることが必要である。この報告書は、ファーストソーラー社の依頼を受け作成したものである。

2. 日本において CdTe 太陽光発電システムの設置に関して考慮すべき災害

地震は日本人がとりわけ関心を寄せる災害の一つである。2011年3月11日に東北地方で発生した大地震そして誘発された津波により大きな被害が生じたのは、まだ我々の記憶に新しい。さらに、この地震により誘発された津波は177か所において大規模な火災を引き起こした。これらの火災は、過去の大地震やそれに続く津波においても引き起こされている¹⁾。これらの火災の主な元は、津波により破壊された海岸沿いに設置された燃料や液化石油ガス(LPG)の貯蔵タンクにあると考えられている²⁾。

日本においては多くの都市が海岸沿いにあるので、地震やそれにより誘発される津波に関してとりわけ関心が高く、CdTe 太陽光発電システムの設置においても検討されるべきである。



図1 2011年3月11日に気仙沼市にて津波により発生した大規模火災²⁾

3. 地震および津波のハザードマップデータ

国土交通省は、「ハザードマップ」のポータルサイトを所有している。そこでは多くの市町村が地震や津波などのハザードマップをホームページにて公開している^{3,4)}。

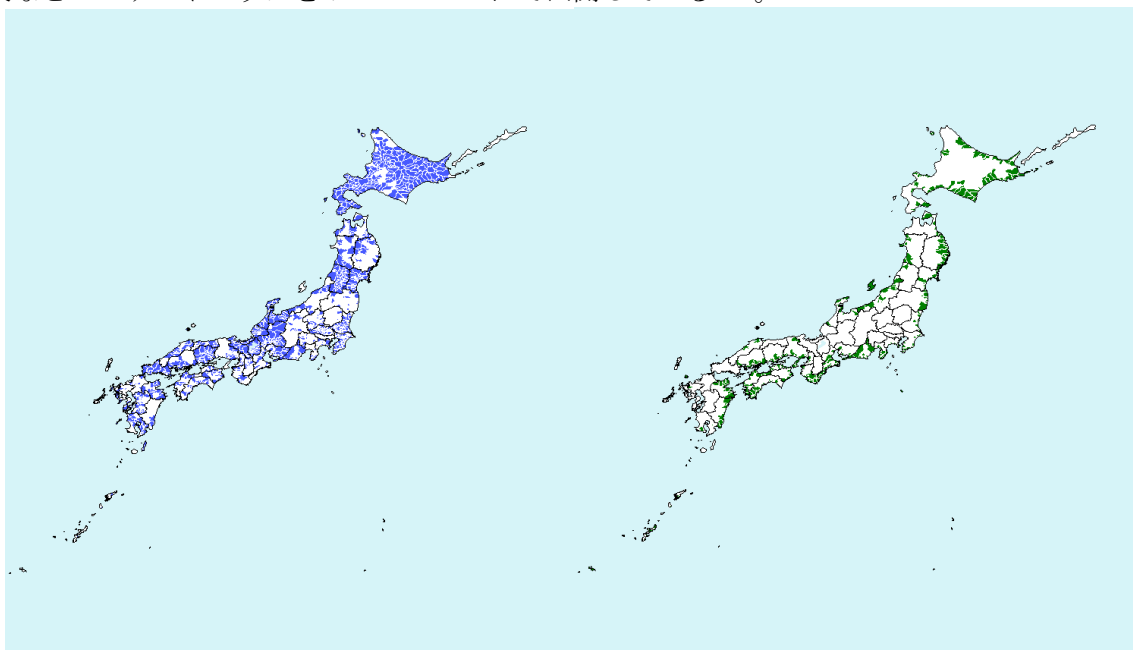
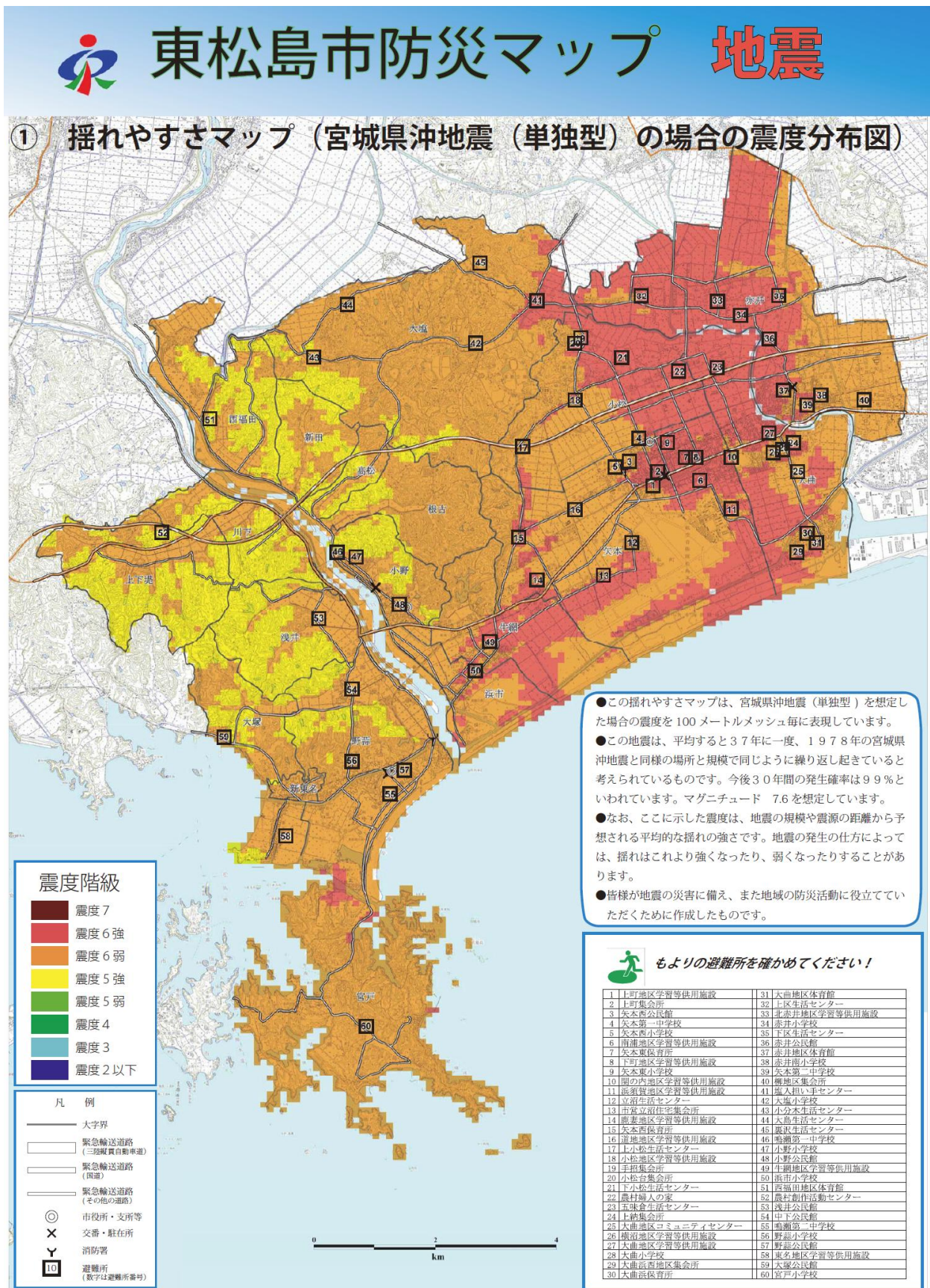


図2 地震（左）および津波（右）のハザードマップの公開されている市町村

これらのハザードマップの詳細や公開の有無は市町村において異なる。東北地方の都市における地震および津波のハザードマップの例を図 3(a), (b)に示す。



このマップの作成に当たっては、国土地理院長の承認を得て、同院発行の数値地図 25000(地図画像)、数値地図 25000(空間データ基盤)を使用したものです(承認番号 平 19 東使第 2 号) このマップについての問い合わせ先: 東松島市建設部建設課 TEL 82-1111

図 3(a) 東松山市の地震ハザードマップ - 宮城県沖地震（単独型）の場合の震度分布図

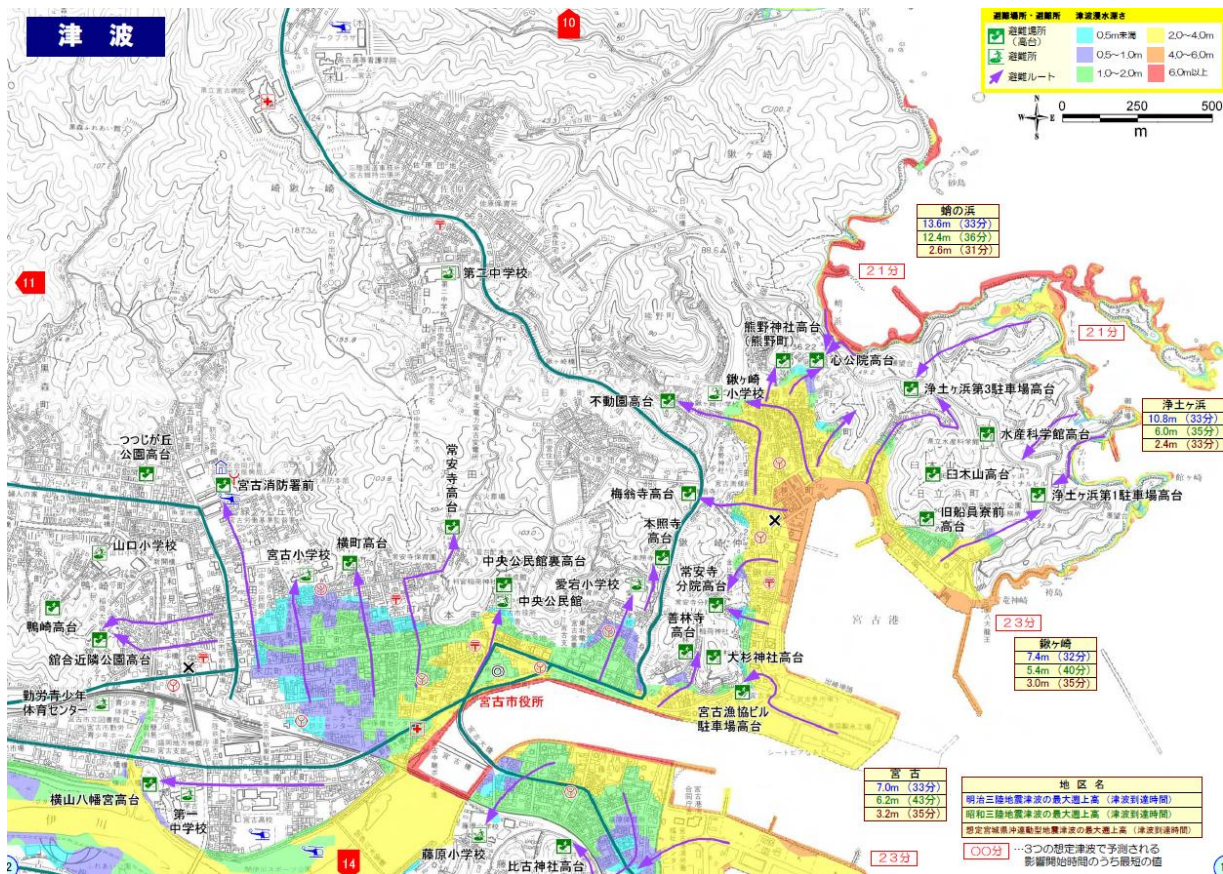


図 3(b) 宮古市の津波ハザードマップ

4. 災害発生時の環境リスク評価とリスク低減のための方策

環境リスク評価は、環境に化学物質が暴露された際の人の健康と環境への潜在的な影響を評価する科学手法である。(図 4)

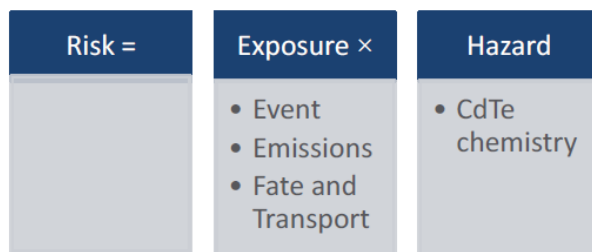


図 4 環境リスク評価の枠組み

鉛、クロムおよびカドミウム等の重金属およびその化合物は、太陽光発電システムの製造に用いられることも多い。CdTe 太陽光発電システムの各災害時の環境リスクに関して以下に述べる。

4.1 地震

地震によるもたらされる太陽光発電モジュールの環境リスクは、被害を受けた地域においてモジュールが破損することに関連付けられる。

CdTe は、溶解度積が 9.5×10^{-35} とかなり小さいので水には不溶性の物質に分類される。もしモジュールが破損したり損害を受けたとしても、CdTe は特殊な環境下に無い限り、モジュールのガラスから環境中に移動していくことは無い。特殊な環境というのは、例えばモジュールが 1 cm 片以下の細かな粒子へと破碎され、酸性水溶液の中にかき混ぜられるようなことである。このような状況は、(メガソーラー発電を建設して運用する) プロジェクトでは起きえないものである⁵⁾。

CdTe の移動度合いは、CdTe の純物質を用いた溶出試験にて確認されている。溶出試験では、一般に環境で起こりえる状況を模した実験条件において、水溶液の中で難溶性金属化合物がイオン化する速度と量を調べる。その中でも、pH 6 の標準水溶液に CdTe を 1 mg/L の割合で投入し、28 日後に溶解する

24 時間後に海水に溶出した Cd の濃度は 17-37 $\mu\text{g Cd/L}$ であるので、モジュールに含まれていた CdTe から約 0.03%/日（含有されている CdTe の重量基準）の速度で Cd が溶出することになる。

4.2.2 津波による潜在的環境リスクの評価

津波に被災した場合、海水に太陽光発電モジュールが破損し分散する可能性がある。津波により引き起こされる環境リスクを溶出試験の結果を用いて評価する。ここでは、1 MW の太陽光発電モジュールが破損して断片となり閉鎖系の海水に浸った場合を想定した。

その場合、潜在的な影響は以下の式にて評価できる。

$$C = (T \times E) / V$$

C: Cd 濃度増大速度 ($\mu\text{g/L/日}$)

T: 太陽光発電モジュールの CdTe 含有総重量 (μg)

E: Cd 溶出率 (%/日) (含有されている CdTe の重量に対して溶出する Cd の重量の割合)

V: 閉鎖系海水の容量 (L)

T に関しては、ファーストソーラー社の 13% 効率の太陽光発電モジュールでは、概ね 0.127 g CdTe/W (つまり $1.27 \times 10^{11} \mu\text{g CdTe/MW}$) とである。E に関しては、表 1 に示した溶出試験の結果から、モジュール中の CdTe 総重量に対して溶出するカドミウム重量は 0.03%/日である。V に関しては、1 MW の太陽光発電システムを導入する場合、概ね 2 ヘクタール ($20,000 \text{ m}^2$) の敷地が必要となり、その敷地が全て深さ 2 m の海水に浸漬するとしたら $40,000 \text{ m}^3$ ($40,000,000 \text{ L}$) の海水量となる。これらのパラメータを用い閉鎖系海水の Cd 濃度増大速度を求めると、約 $0.95 \mu\text{g/L/日}$ となる。しかしながら、上記の計算は最悪のシナリオ、つまり全ての太陽光発電モジュールが津波により破壊され、9 mm 角の小さな断片となり閉鎖系の海水に浸漬した場合を想定している。従って、閉鎖系海水の Cd 濃度増大速度は $0.95 \mu\text{g/L/日}$ よりもはるかに小さいと予想される。

日本では、水質汚濁に係る環境基準のうちの人の健康の保護に関する環境基準（健康項目）では、Cd は $3.0 \mu\text{g/L}$ と定められている。この基準は、年間平均値であり、慢性（長期）暴露を想定したものと見なすことができる。水生生物の保全に係る Cd の水質環境基準は、日本においては検討されてはいるが未だ設定されていない¹⁰⁾。しかも、人の健康の保護に関する環境基準は、急性（短期）暴露と慢性（長期）暴露の区別がされていない。一方、米国環境保護局 (US EPA) では、人の健康と水生生物の保護に関する地表水の水質基準を、カドミウムを含む約 150 の汚染物質に関して設定している。しかもそれらの基準は、急性と慢性、そして淡水と海水により区別されている。津波による太陽光発電モジュールの破壊による Cd の溶出は突発性のものであり、急性（短期）暴露と見なせる。従って、米国環境保護局の海水の急性水質基準である $40 \mu\text{g/L}$ と比較した場合、津波被災後に海水に太陽光発電モジュールの破片が散らばったとしても、ある程度長期間は水質基準を超えないと考えられる。

それでもなお Cd の溶出を最小限にとどめるために、津波後に海水に浸漬した太陽光発電モジュールを早急に回収することが望まれる。

4.3 津波後の大火災

Beckmann と Mennenga は、CdTe 太陽光発電モジュールが火事になった際の周囲の影響について検討している¹²⁾。彼らは、CdTe 太陽光発電モジュールが燃焼している周辺での大気中の Cd 濃度を推計した。彼らの最悪シナリオ、つまりモジュールの Cd 含有量が最大の 66.4 g/m^2 かつ $1,000 \text{ m}^2$ の広域に設置されたものが火災となった場合の、推計可能な最短距離である 100 m 離れた場所での大気中に含有される Cd 濃度を計算した。それでも Cd 濃度は 0.66 mg/m^3 であり、不可逆的な健康影響もしくは長期継続する重大な健康影響が出る閾値の最大濃度を示す急性レベル AEGL-2 (10 min.) の 1.4 mg/m^3 と比較してもはるかに小さい濃度である¹³⁾。しかも彼らの推計は、モジュールに含有されている全ての Cd が、CdTe から Cd 蒸気として完全に放出するものと見なした結果である。つまり、大気中の Cd 濃度を推計するにあたり、Cd が酸化カドミウム (CdO) となる反応や溶融したガラスに拡散することは考慮していない。Fthenakis らは、CdTe 太陽光発電モジュールを典型的な家屋や商業ビルの火災時に到達する温度である 760°C から $1,100^\circ\text{C}$ に加熱する実験を行い、99% 以上の Cd が溶融したガラスの中に残留することを示している¹⁴⁾。さらに 4.2.2 にて述べたように、ファーストソーラー社の効率 13% の太陽光発電モジュールの Cd 含有量は 7.7 g/m^2 と著しく小さい。従って、火災となった CdTe 太陽光発電モジュール周辺の地表での大気中の Cd 濃度は、上記の急性レベル閾値 AEGL-2 (10 min.) の 1.4 mg/m^3 と比較して著しく小さくなるものと考えられる。

津波後に大火災がどこで起きるのか、そしてどれだけの時間火災が続くのか、CdTe 太陽光発電モジュールがそれらの火災に巻き込まれるか、それとも海水に浸漬されるのかどうかについては不確かである。従って、太陽光発電モジュールが必ずしも津波後の大火災に巻き込まれるとは限らない。

以上を鑑み、津波により誘発される大火災によりもたらされる CdTe 太陽光発電モジュールの環境リスクは小さいものと判断される。

4.4 CdTe 太陽光発電システムの環境リスクに関する他の既存研究

日本の電力中央研究所は、1998 年度に NEDO の助成を受けて CdTe 太陽光発電システムの環境リスクを検討した。そこでは、火災時の Cd の放出と、破壊されたモジュールからの降雨による Cd の溶出が検討されている¹⁵⁾。

様々な CdTe 薄膜太陽光発電モジュールに対して、750-1000°Cの温度範囲で燃焼試験が行われ、Cd の揮発速度が測定された。800-1000°Cの温度範囲での燃焼実験において、モジュールからの Cd の揮発重量は 0.25%以下であった。これらの結果を用いて、木造家屋が火災になった場合の煙中そして家屋周辺の地表付近での大気中の Cd 濃度が推計された。いずれの場合も、Cd 濃度は規制値よりも小さい値となることが確認されている。

破壊された CdTe 太陽光発電モジュールのバッチ溶出試験が、酸性雨雰囲気（つまり pH が 4.8 の水）かつ 40°Cにて、10 分—72 時間の振とう状態にて行われた。それら全ての溶出試験の結果、水中のカドミウム濃度は検出限界以下の値であった。それゆえ、通常的环境雰囲気下では、破壊された CdTe 太陽光発電モジュールからのカドミウムの溶出は無視できるほど小さいと結論づけられている。

これら結果により、CdTe 太陽光発電システムを使うことは、環境リスクの観点からは問題無いことが結論づけられている。

5. 結論

本報告書では、地震、津波およびそれにより誘発される大火災に焦点を当て、日本国内で大災害が発生した場合の CdTe 太陽光発電システムの環境リスクを検討した。CdTe 太陽光発電モジュールが、地震および津波によりどれだけ破壊されるか、そして誘発される大火災に巻き込まれるかもしくは海水中に浸漬されるかに関しては不確実性が大きい。しかしながら、たとえ最悪の状態になったとしても、大気や海水中のカドミウム濃度が環境規制値を超えることは起きにくい。それゆえ、CdTe 太陽光発電システムの大災害時の環境リスクはかなり小さいものと考えられる。

なお、(保険などを考慮した) 商業的な理由により、太陽光発電システムが津波ハザード地域に建設されることは少ない。それでもなお、地震や津波により破壊された、もしくは海水に浸漬された CdTe 太陽光発電モジュールは、カドミウムの放出を最小限に抑制するためにも早急に回収されるべきである。

Reference

- 1) <http://www.shimz.co.jp/theme/earthquake/fire.html>
- 2) Kitamura, Y. Consideration to the tsunami fire in Kesenuma city 2012
- 3) <http://disapotal.gsi.go.jp/bousaimap/index.html?code=1>
- 4) <http://disapotal.gsi.go.jp/viewer/index.html?code=1>
- 5) First Solar. 2013a. Memo from P. Sinha to K. Brutsaert. Environmental Risk Assessment of Potential Catastrophic Events. July 2.
- 6) Kaczmar, S., Evaluating the Read-Across Approach on CdTe Toxicity for CdTe Photovoltaics, SETAC North America 32nd Annual Meeting, Boston, MA, November 2011
- 7) First Solar. 2012. Appendix 10: PV module detection and handling plan”, Topaz solar farm project.
- 8) Takahashi, T., and S.C. Sutherland. 2013. Climatological Mean Distribution of pH and Carbonate Ion Concentration in Global Ocean Surface Waters in the Unified pH Scale and Mean Rate of their Changes in Selected Areas. OCE 10- 38891. Lamont-Doherty Earth Observatory, Columbia University, Palisades, NY
- 9) First Solar. 2013b. Memo from P. Sinha to K. Brutsaert. Environmental Risk Assessment of Potential Tsunami Impacts. Nov. 1
- 10) http://www.env.go.jp/council/toshin/t094-h1504/houkoku_2.pdf
- 11) <http://water.epa.gov/scitech/swguidance/standards/criteria/current/index.cfm>
- 12) Beckmann, J., and Mennenga A., 2011. Calculation of emissions when there is a fire in a photovoltaic system made of cadmium telluride modules. Bavarian Environmental Agency, Augsburg, Germany.
- 13) <http://www.epa.gov/oppt/aegl/index.htm>
- 14) Fthenakis, V. et al (2005): Emissions and Encapsulation of Cadmium in CdTe- PV Modules During Fires. Progress in Photovoltaics: Research and Applications

15) Central Research Institute for the Electric Power Industry (CRIEPI). 1999. Fiscal 1998 Report on the Results of Work Entrusted to the Renewable Energy and Industrial Technology Development Organization.