

УДК 537.32



Такенобу Кадзикава

Такенобу Кадзикава¹, Риодзи Фунахаши²

¹Технологический институт Шонан

²Национальный институт передовой
промышленной науки и техники



Риодзи Фунахаши

**НОВЕЙШИЕ РАЗРАБОТКИ
В ОБЛАСТИ ТЕХНОЛОГИИ
ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ГЕНЕРИРОВАНИЯ
ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ЯПОНИИ**

Технология термоэлектрического генерирования электроэнергии (ТЭГЭЭ) в Японии воспринимается как одна из инновационных энергетических технологий, способствующих созданию повседневной комфортной жизни человека и общества в ближайшем будущем под давлением существующих глобальных экологических и серьезных энергетических проблем (3E+S). При поддержке государства и/или частных предприятий в Японии активно выполняются научно-исследовательские проекты по технологии ТЭГЭЭ: 1) исследования в сфере терморегулирования, а также создания материалов и технологий для утилизации неиспользованного тепла, 2) разработка использования ТЭГЭЭ для газовой цементационной печи, 3) разработка термоэлектрического генерирования с использованием отработанного тепла на сталелитейном заводе, 4) разработка трубчатого термоэлектрического генератора, 5) разработка системы опреснения, работающей на солнечной энергии с использованием технологии термоэлектрического генерирования электроэнергии, 6) практическая разработка термоэлектрического генератора без содержания редких металлов для рекуперации тепла выхлопных газов автомобилей, 7) практическое применение многослойного термоэлектрического генератора для беспроводного сенсорного сетевого узла с автономным питанием. В качестве перспектив на будущее рассмотрены такие аспекты как усовершенствованные наноструктурные ТЭ материалы, органические/гибридные ТЭ материалы, теория надежности, техника безопасности, в том числе анализ угроз, с целью планомерного внедрения приложений ТЭГЭЭ в практику.

Ключевые слова: термоэлектрическая технология выработки электроэнергии, наноструктурный термоэлектрический материал, рекуперации тепла.

Thermoelectric power generation (TEPG) technology in Japan has been noticed as one of the innovative energy technologies in order to contribute to the establishment of comfortable society and individual life in the real world in the near future due to push-forward by globally environmental issues and serious energy problems (3E+S). Several R&D projects on TEPG technology in Japan have been actively ongoing such as 1) Thermal Management, Materials and Technology Research to utilize unused heat in the social environment, 2) Development of TEPG Application to a Gas Carburizing Furnace, 3) Development of Thermoelectric Generation Using Waste Heat in Steel Works, 4) Development of Tubular Thermoelectric Generator (TTEG), 5) Development of Solar Powered Desalination Using Thermoelectric Power Generation, 6) Practical Development of Rare-Metal-Free Thermoelectric Generator for Automotive Waste Heat Recovery, 7) Practical-use of

Multilayer type Thermoelectric Generator for Self-powered Wireless Sensor Network Node supported by government and /or private enterprise funds. As the future prospects several aspects, such as advanced nano-structured TE materials, organic/hybrid TE materials, durability science, safety engineering including hazard analysis have been discussed aiming the smooth promotion of TEPG applications to the real world.

Key words: thermoelectric power generation, nano-structured TE material, heat recovery.

Введение

В соответствии с парижским соглашением – рамочной конвенцией ООН об изменении климата №21 (COP21) и базовым научно-техническим планом Японии №5 (2016-2020), перед Японией поставлена задача справиться с так называемыми 3E+S серьезными проблемами, а именно энергетической безопасностью (E), сохранением окружающей среды (E), активизацией экономики (E) и безопасностью (S) в условиях ограниченности ископаемых ресурсов, небольшой территории страны, сохранения невероятно высокого уровня валового национального продукта и повышения уровня понимания безопасности здоровья и угроз [1]. Общий КПД использования энергии по всей энергетической системе в Японии составил всего около 34%. Это означает, что 66% поставляемой энергии рассеивается в окружающей среде в виде низкопотенциальной тепловой энергии. Поэтому приходит понимание необходимости срочного внедрения передовых технологий тепла на основе 3R – Reduce (снижение), Reuse (повторное использование) и Recycle (утилизация). В этих условиях технология ТЭГЭЭ воспринимается как одна из инновационных энергетических технологий, способствующих повышению комфортности жизни общества в ближайшем будущем. Поэтому государственные организации, такие как Министерство экономики, торговли и промышленности (METI), Министерство образования, культуры, спорта, науки и техники (MEXT) и Министерство окружающей среды (MOE), а также различные отрасли промышленности, такие как сталелитейная, химическая, информационная, энергетическая, и т.д. намерены уделить внимание исследованиям и разработкам различных способов применения ТЭГЭЭ. В Японии выполняются научно-исследовательские проекты в сфере технологии ТЭГЭЭ:

- 1) исследования в сфере управления тепловым процессом, разработка материалов и технологий для утилизации неиспользованного тепла в социальной среде,
- 2) разработка применения ТЭГЭЭ для газовой цементационной печи,
- 3) разработка термоэлектрического генерирования с использованием отработанного тепла на сталелитейном заводе,
- 4) разработка трубчатого термоэлектрического генератора,
- 5) разработка системы опреснения на солнечной энергии с использованием технологии термоэлектрического генерирования электроэнергии,
- 6) практическая разработка термоэлектрического генератора, не содержащего редких металлов, для рекуперации тепла выхлопных газов автомобилей,
- 7) практическое применение многослойного термоэлектрического генератора для беспроводного сенсорного сетевого узла с автономным питанием, и т.д.

В данной статье приведен анализ новейших разработок в области термоэлектрической технологии в Японии, а также рассмотрены перспективы коммерциализации применения ТЭГЭЭ.

Некоторые актуальные темы исследований и разработок в Японии.

Исследования в сфере терморегулирования и создания материалов и технологий (TherMAT)

TherMAT это поддерживаемый правительством 10-летний проект научных исследований и разработок, цель которого – создание новых высокоэффективных систем, способных обеспечить значительное снижение потребления энергии и, в конечном итоге, помочь рациональному использованию энергии во многих аспектах жизни общества [2]. Проект TherMAT осуществляется с 2013 года под руководством Х. Обара Национальным институтом передовой промышленной науки и технологии (AIST) и состоит из 8 основных направлений:

1. Технология аккумулирования тепла,
2. Технология теплозащиты,
3. Технология теплоизоляции,
4. Технология термоэлектрического преобразования,
5. Технология рекуперации отработанного тепла,
6. Технология тепловых насосов,
7. Технология управления тепловым процессом,
8. Базовая энергетическая технология.

Общий бюджет исследований и разработок в 2015 году составил около 15.4 млн \$, в том числе около 1.7~2.0 млн \$ на технологию термоэлектрического преобразования.

Задача направления технологии термоэлектрического преобразования состоит в следующем: конечная цель проекта к 2023 году – это:

1. Создание технологии ТЭГЭЭ модулей с $ZT = 4$ для систем из неорганических материалов;
2. Технологии ТЭГЭЭ модулей с $ZT = 2$ для систем из органических материалов, включая гибридные.

Для достижения конечной цели промежуточная цель предусматривает создание систем усовершенствованных ТЭГЭЭ материалов на основе неорганических материалов с $ZT = 2$ и органических материалов с $ZT = 1$ к 2018 году.

Шесть отечественных частных компаний, AIST и несколько университетов объединились в группу ТЭГЭЭ. Проект ТЭГЭЭ включает 8 позиций:

1. Высокоэффективные термоэлектрические материалы и устройства на базе нанотехнологии и/или технологии слоистых структур от AIST.
2. Термоэлектрическое устройство и материалы на основе высокомолекулярного полимера от AIST и Университета Осака.
3. Термоэлектрическое устройство, использующее углеродную систему, такую как углеродная нанотрубка (УНТ), графит, и т.д. от AIST. Образец гибкого термоэлектрического устройства на основе УНТ, полученного с помощью печатной технологии, приведен на рис. 1.
4. Термоэлектрическое устройство на основе долговечных скуттерудитных материалов, обеспечивающих $ZT > 1.1$, т.е. коэффициент преобразования 8%, от FURUKAWA, как показывают экспериментальные результаты по долговечности скуттерудитных термоэлектрических модулей на рис. 2.
5. Система рекуперации отработанного тепла класса 5-10 кВт с использованием технологии термоэлектрического генерирования электроэнергии от HITACHI.

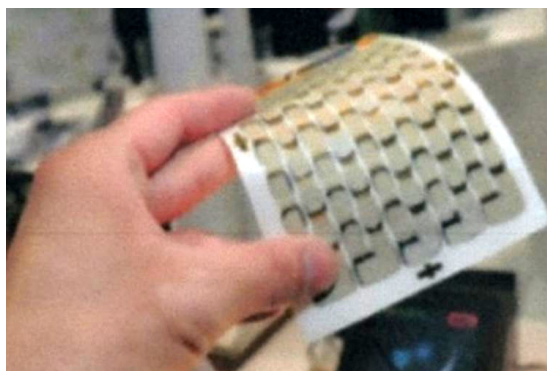


Рис. 1. Гибкое термоэлектрическое устройство на основе углеродной нанотрубки.

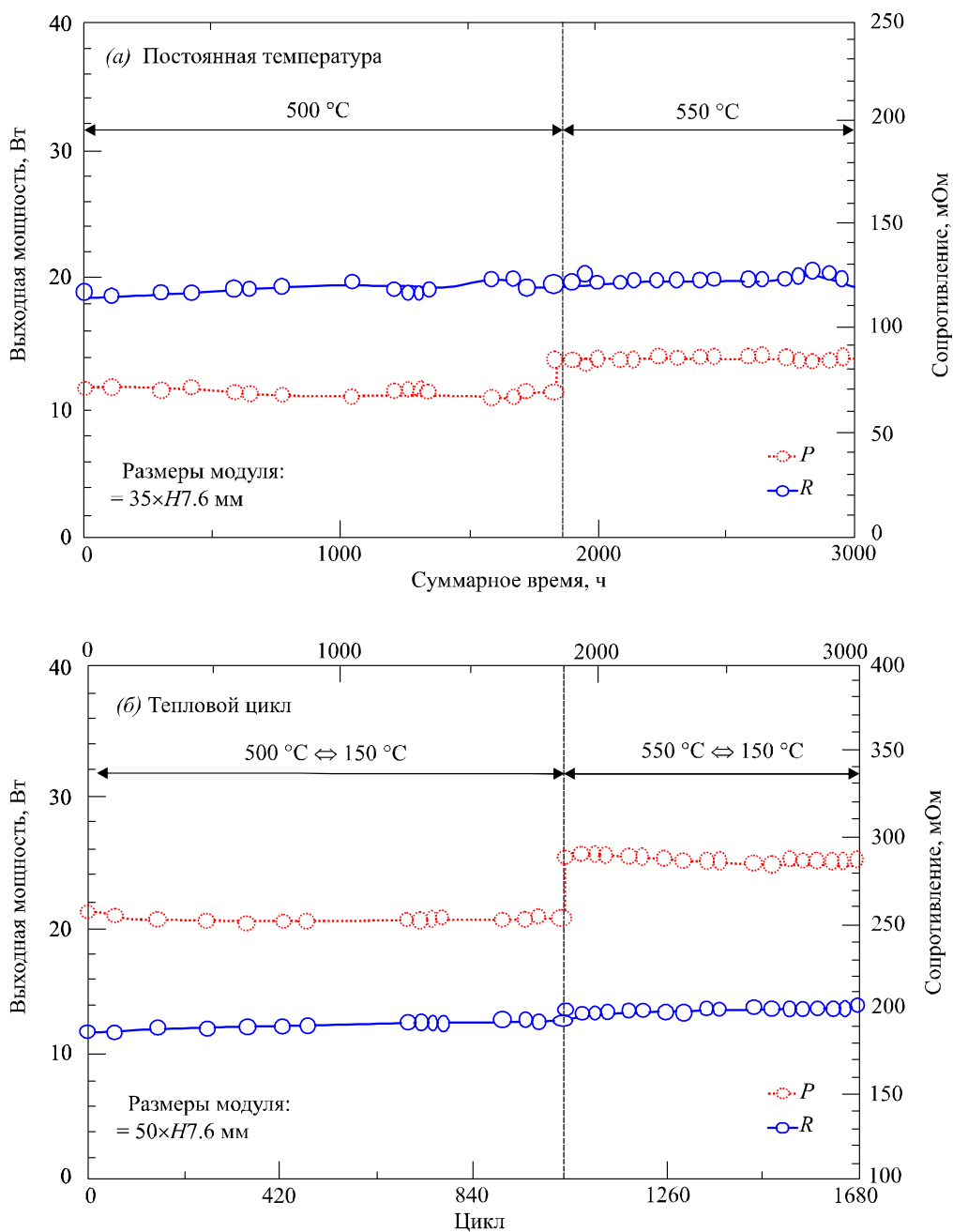


Рис. 2. Результат испытания на долговечность скуттерудитных термоэлектрических модулей для режима постоянной температуры (а) и режима теплового цикла (б).

6. Гибкие органические термоэлектрические материалы и устройства, контролирующие ориентацию и распределение УНТ (углеродная нанотрубка) и разработка усовершенствованного гибрида на основе технологии получения наночастиц от FUJIFILM.
7. Высокоэффективное спеченное клатратное устройство с использованием технологии электродной сварки для практического применения от FURUKAWA DENKO.
8. Силицидные термоэлектрические материалы, устройства и оптимальные системы для автомобильных приложений от Университета Ямагучи и Nippon Thermostat Inc.

Разработка технологии термоэлектрического генерирования электроэнергии и (ТЭГЭЭ) с применением рекуперации отработанного тепла сталеплавильной системы

Сталелитейная промышленность Японии достигла значительного снижения потребления энергии для получения высококачественной стали и стремится к дальнейшему повышению эффективности этой технологии. Установлено, что технология рекуперации отработанного тепла очень важна для каждого производственного участка сталелитейного завода. Технологии термоэлектрического генерирования электроэнергии получила предпочтение с точки зрения надежности, компактности и экологической безопасности.

Демонстрационный эксперимент для системы ТЭГЭЭ класса 10 кВт, установленной на линии непрерывного литья JFE, был проведен с целью коммерциализации крупномасштабного применения ТЭГЭЭ класса 100 кВт на основе известного генераторного модуля теллурида висмута KELK, как показано на рис. 3.

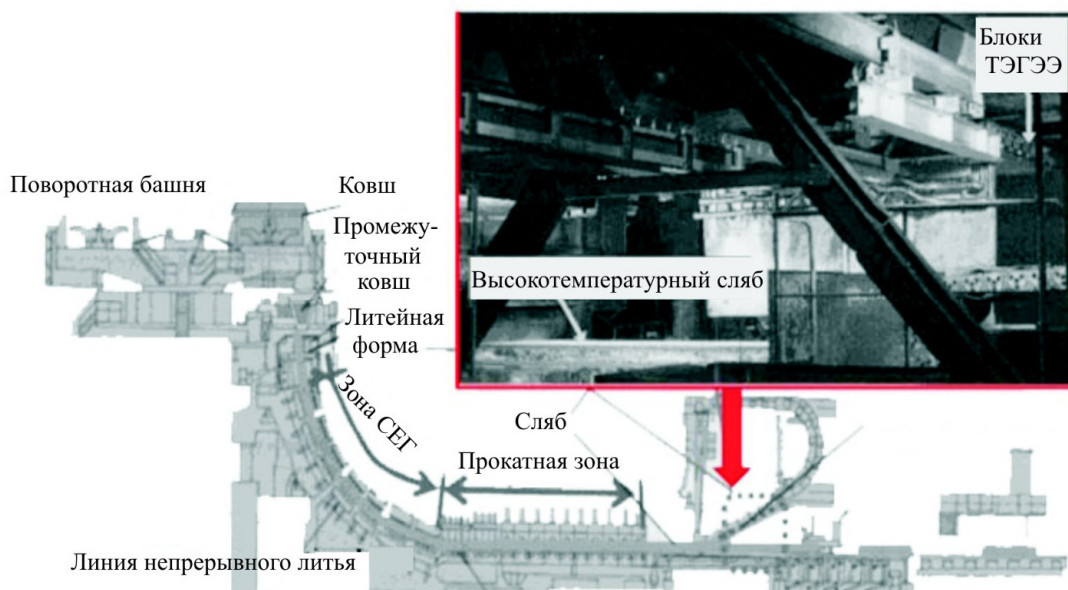


Рис. 3. Линия непрерывного литья JFE, с установленными блоками ТЭГЭЭ.

Этот проект осуществлен командой JFE, KELK и университетом Хоккайдо при частичной поддержке NEDO, и частного фонда по окончании проекта NEDO [3]. Источником высокотемпературного тепла служит теплота излучения от движущегося сляба, температура которого составляет около 1073 К ~ 1273 К, а источником низкой температуры служит заводская вода примерно комнатной температуры. Система ТЭГЭЭ имеет 2 м в ширину и 4 м в длину и состоит из 56 блоков ТЭГЭЭ, как показано на рис. 4, для генерирования около 10 кВт постоянного тока, с установленным на ней устройством аварийных контрмер.

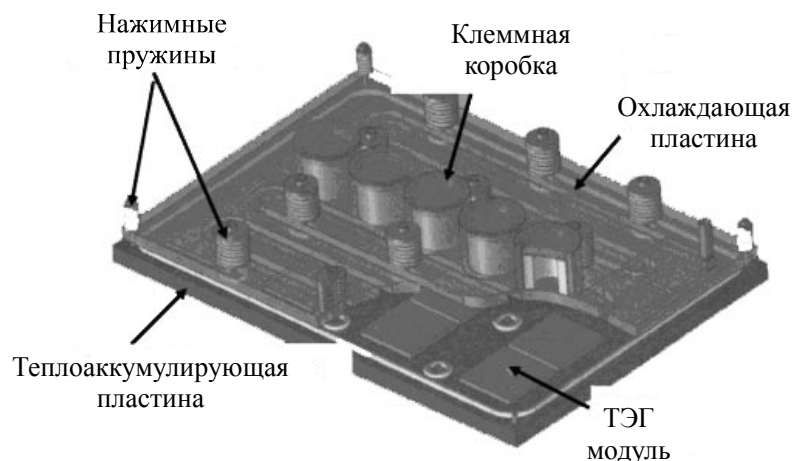


Рис.4. Компоненты блока ТЭГ (размер: 400 мм×280 мм), состоящие из 16 промышленных высокоэффективных модулей ТЭГ 50мм×50мм×4.2мм производства KELK.

Выходная мощность этой технологии термоэлектрического генерирования электроэнергии составляет около 9 кВт (т.е. 1.7 кВт/м² на основание модуля) при температуре сляба 1188 К и ширине сляба 1.7 м. Экспериментальные результаты удовлетворительно согласуются с рассчитанными значениями, полученными в ходе анализа с использованием моделирования, как показано на рис. 5.

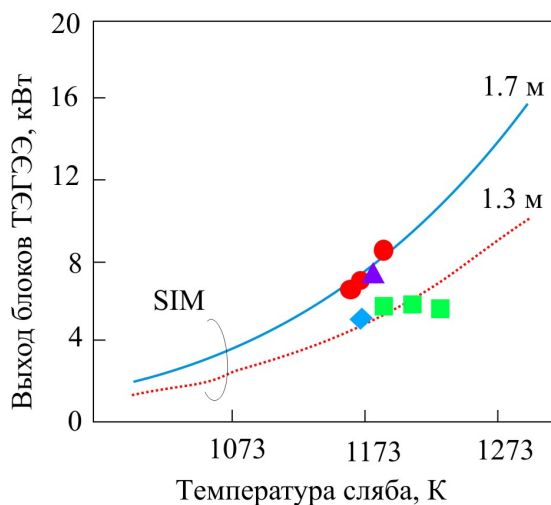


Рис.5. Экспериментальные результаты выхода мощности в зависимости от температуры сляба для системы ТЭГЭЭ JFE по сравнению с имитационными моделями.

1. ● – ширина сляба = 1.7 м, эксперимент; 2. ▲ – ширина сляба = 1.6 м, эксперимент;
3. ◆ – ширина сляба = 1.4 м, эксперимент; 4. ■ – ширина сляба = 1.3 м, эксперимент;
5. ——— – ширина сляба = 1.7 м, имитация; 6. – ширина сляба = 1.3 м, имитация.

В будущем, несомненно, будут получены более высокие значения выходной мощности благодаря разработке надежных ТЭГЭЭ модулей на уровне температуры выше верхнего температурного предела для модулей *Bi-Te*. Поскольку на данном этапе температура поверхности ТЭГЭЭ модулей на основе *Bi-Te* ограничивается во избежание тепловой деградации.

Исследования и разработки системы опреснения на солнечных батареях с применением технологии термоэлектрического генерирования электроэнергии

Недостаток пресной воды – одна из крупнейших социальных проблем для всего мира в

ближайшем будущем. Возникла настоятельная необходимость разработки экономной технологии системы опреснения в сочетании с возобновляемыми источниками энергии, такими как солнечная энергия, без потребления большого объема ресурсов ископаемого топлива.

Исходя из принципа простоты и непрерывности работы без технического обслуживания, высокого качества свежей воды, концепция гибридной системы многоступенчатого опреснения и обратного осмоса на солнечных батареях с применением технологии термоэлектрического генерирования электроэнергии была предложена конференцией TDS, учрежденной несколькими частными компаниями и университетами под руководством профессора И.Хорита (Токийский технологический институт), с международным сотрудничеством с 2010 года [4]. Предлагаемая система состоит из установки концентрирования солнечной энергии с высокотемпературным (около 850 К) накопителем тепловой энергии, нового ТЭПГ (термоэлектрического и парогенератора), и двух видов систем опреснения (многоступенчатого опреснения и обратного осмоса) как основных подсистем, которые показаны на рис. 6.

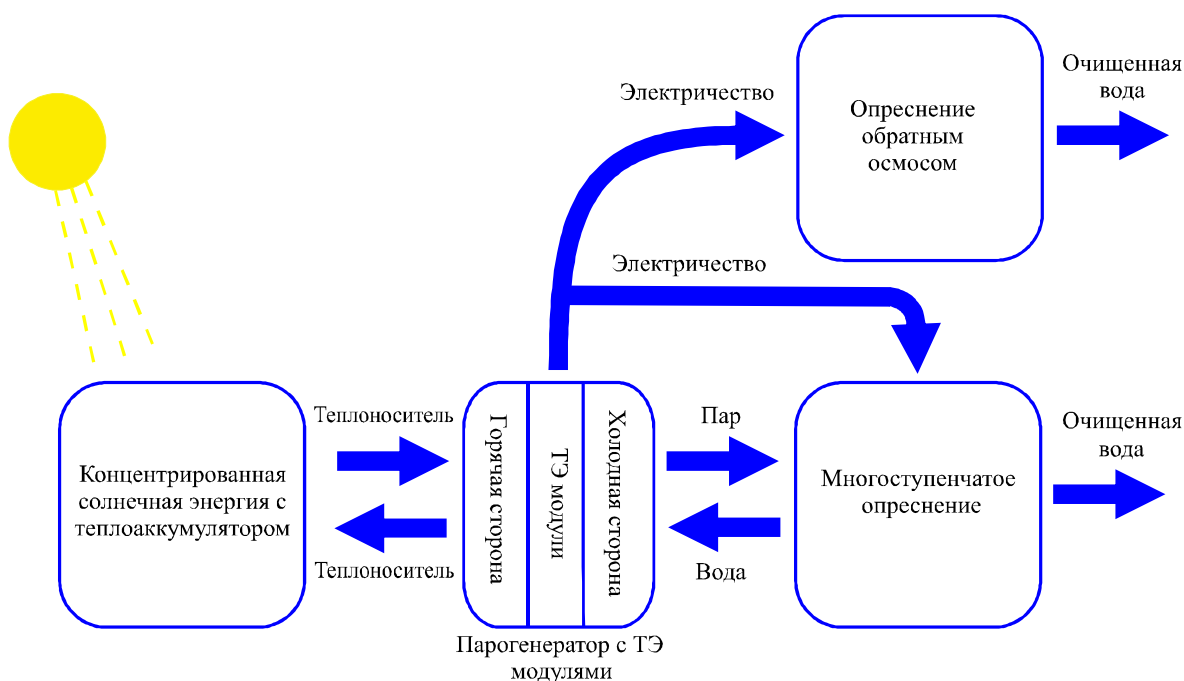


Рис. 6. Принципиальная система опреснения на солнечных батареях с применением термоэлектрического генерирования мощности.

Для ТЭПГ горячая сторона ТЭГЭЭ устройств нагревается высокотемпературным соевым расплавом из накопителя тепловой энергии, питаемого блоком концентрирования солнечной энергии, а холодная сторона ТЭГЭЭ устройств охлаждается благодаря высокой удельной теплоте постоянно подаваемой воды для получения низкотемпературного пара, который используется первым каскадом блока многоступенчатого опреснения. Вся израсходованная тепловая энергия, используемая для охлаждения ТЭГЭЭ устройств в системе ТЭПГ, эффективно и непрерывно утилизируется в системе, тогда как для систем обычных ТЭГЭЭ вода, охлаждающая холодную сторону ТЭ устройств, отводится от системы в окружающую среду. Анализ осуществимости с учетом оценки стоимости показал, что предлагаемая система опреснения имеет хороший потенциал, чтобы быть наиболее конкурентоспособным решением, по крайней мере, на Среднем и Ближнем Востоке. Небольшой эксперимент для подтверждения правильности концепции системы ТЭПГ как

наиболее важного компонента был проведен с целью подтверждения характеристик системы, таких как статический тепловой баланс, динамический отклик на баланс массы, которые необходимы для точного проектирования прототипа системы опреснения, использующей солнечную энергию, в сочетании с системой ТЭГЭЭ. Экспериментальная установка показана на рис. 7.



Рис. 7. Экспериментальная установка подтверждения концепции.

Практическое применение многослойного термоэлектрического генератора для беспроводного сенсорного сетевого узла с автономным источником питания

Murata Manufacturing Co., Ltd на собственные средства разработала термоэлектрический генератор с целью отбора энергии для беспроводного сенсорного сетевого узла с автономным источником питания и практического использования с применением многослойного керамического конденсатора для производства ТЭГЭЭ [5]. Термоэлектрическое устройство состоит из композита $Ni_{0.9}Mo_{0.1}$ и $Ni_{1-x}Mo_x$ для ветвей p -типа, и $(La_ySr_{1-y})TiO_3$ для ветвей n -типа. В термоэлектрическом устройстве материалы p - и n -типа соединены непосредственно без электродного металла. Между ними вставлен тонкий слой изолятора $(Yb, Zr)O_2$. Эти материалы были выбраны благодаря одинаковым коэффициентам теплового расширения, снижающим термическое напряжение между ними. Образец ТЭГЭЭ устройства показан на рис. 8.

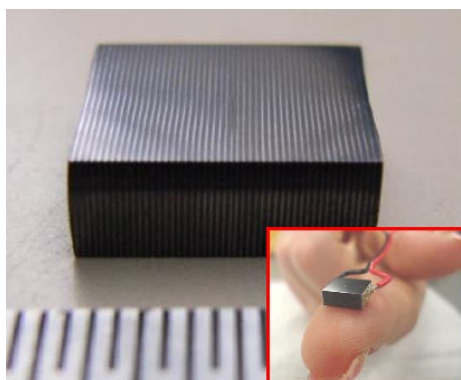


Рис. 8. Образец ТЭГЭЭ модуля многослойного типа для ТЭГЭЭ устройства аккумуляции энергии.

Промышленный прототип интегрированного с ТЭГЭЭ беспроводного сенсорного узла был установлен, как показано на рис. 9, и закреплен на заводском стальном трубопроводе, как показано на рис. 10.



Рис. 9. Промышленный прототип встроенного в ТЭГЭЭ беспроводного сенсорного узла.



Рис. 10. Установка встроенного в ТЭГЭЭ беспроводного сенсорного узла на трубу.

Силовые характеристики термоэлектрического устройства из 50 пар размером 6.0 мм×6.9 мм×2.7 мм выглядят следующим образом: напряжение разомкнутой цепи и максимальная выходная мощность составляют, соответственно, 52.3 мВ и 105 мкВт при разности температур 10 К. В течение более 12 месяцев успешно проводились демонстрационные испытания с целью мониторинга температуры через каждые 20 секунд, как показано на рис. 11.

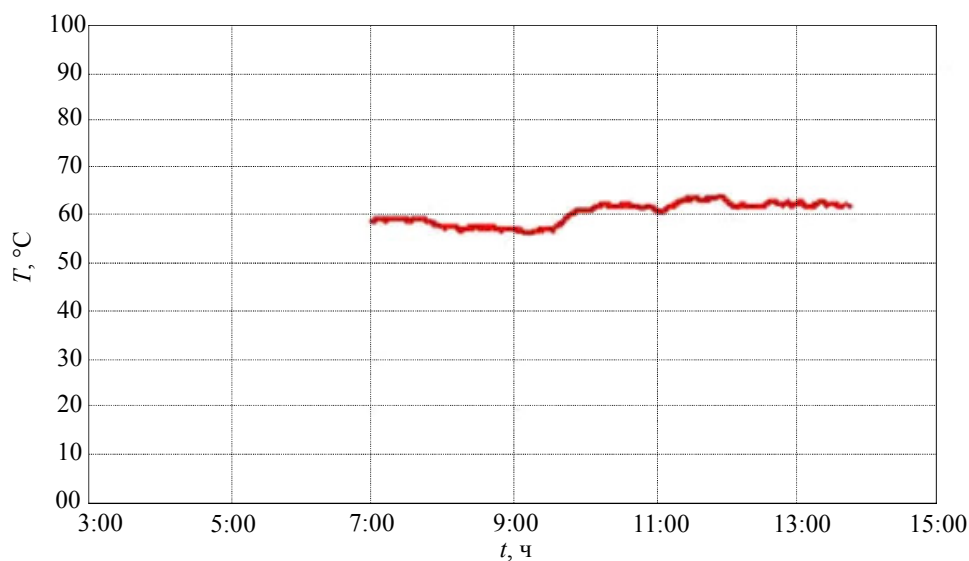


Рис. 11. Демонстрационный результат монитора температуры трубы.

Перспективы

Мы занимались многочисленными исследованиями с целью совершенствования технологии ТЭГЭЭ для практического применения параллельно с описанными выше разработками для академической науки и промышленности при поддержке METI, NEDO, MEXT, JST и/или частных предприятий:

- Сложная наноструктурная ТЭ технология для увеличения ZT методом «снизу-вверх» ($ZT > 4$).
- Разработка улучшенных ограниченных/гибридных ТЭ материалов.
- Прогресс науки о надежности и техники безопасности в области ТЭГЭЭ.
- Утверждение международной стандартизации для измерения ТЭГЭЭ.

Сложная наноструктурная технология ТЭ устройств основана на том, что наноструктура для легированного $Mg PbTe$ не ухудшает электрические свойства, такие как коэффициент Зеебека и электропроводность, но независимо снижает решеточную теплопроводность, как установлено AIST [6]. Следовательно, для оптимального наноструктурного ТЭ устройства легированного $Mg PbTe-4\%Na$ максимальное значение ZT можно повысить до 1.8 при 810 К по сравнению с максимальным значением ZT 1.1 при 710 К для нелегированного материала, как показано на рис. 12.

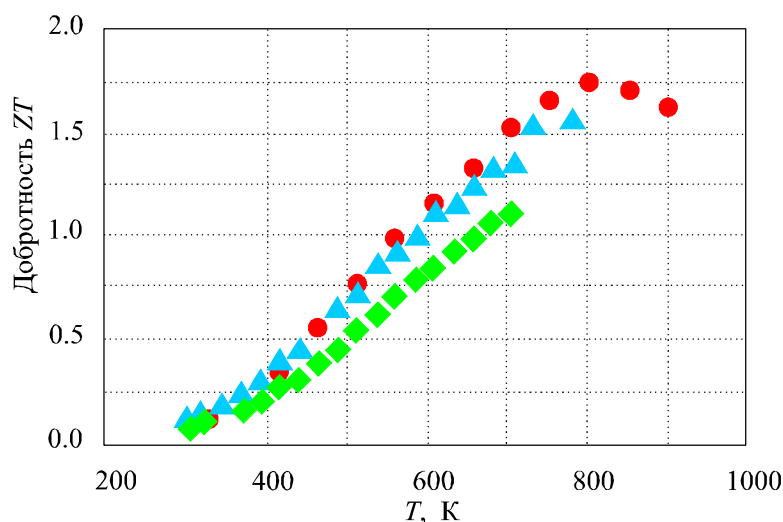


Рис. 12. Эффект повышения ZT благодаря наноструктурной технологии для системы $PbTe-4\%Na$:

1. ● – Mg – легированный $PbTe-4\%Na$ спеченный;
2. ▲ – Mg – легированный $PbTe-4\%Na$ плавленый;
3. ◆ – $PbTe-4\%Na$ плавленый.

Образец ТЭ модуля, состоящий из восьми пар наноструктурных спеченных ветвей легированного $Mg PbTe-4\%Na$ p -типа и $PbTe-0.2\%PbI_2$ n -типа был успешно изготовлен и генерировал 3.55 Вт при разности температур 570 К (высокой температуры 873 К и низкой температуры 303 К на электродах, соответственно). Признано важным, чтобы контролируемые наноструктурные технологические приемы были разработаны/установлены для всех систем термоэлектрических материалов по форме, размеру, плотности, компонентам, и т.д.

Значительное внимание уделялось в последнее время полимерным термоэлектрическим материалам, благодаря таким их достоинствам как низкая стоимость, простота сборки, легкий вес, и доступность эффективного метода восходящего проектирования для расширения

областей применения термоэлектричества. Были исследованы тройные органические-неорганические гибридные системы, состоящие из проводящего полимера (*Ni*-этилентетратиолат: *Ni*-PETT), ПВХ (поливинил хлорид) и УНТ и получены обнадеживающие экспериментальные результаты ZT 0.28 при 340 К по сравнению с характеристиками пленки PEDOT-PSS (поли 3, 4-этилендиокситиофен-полистиросульфонат) и пленки PEDDOT-TSS/CNT, как показано на рис. 13 группой Toshima [7, 8]. Можно утверждать, что новейшие экспериментальные результаты исследований по различным видам органических термоэлектрических материалов, включая гибридные системы, будут весьма перспективны в будущем.

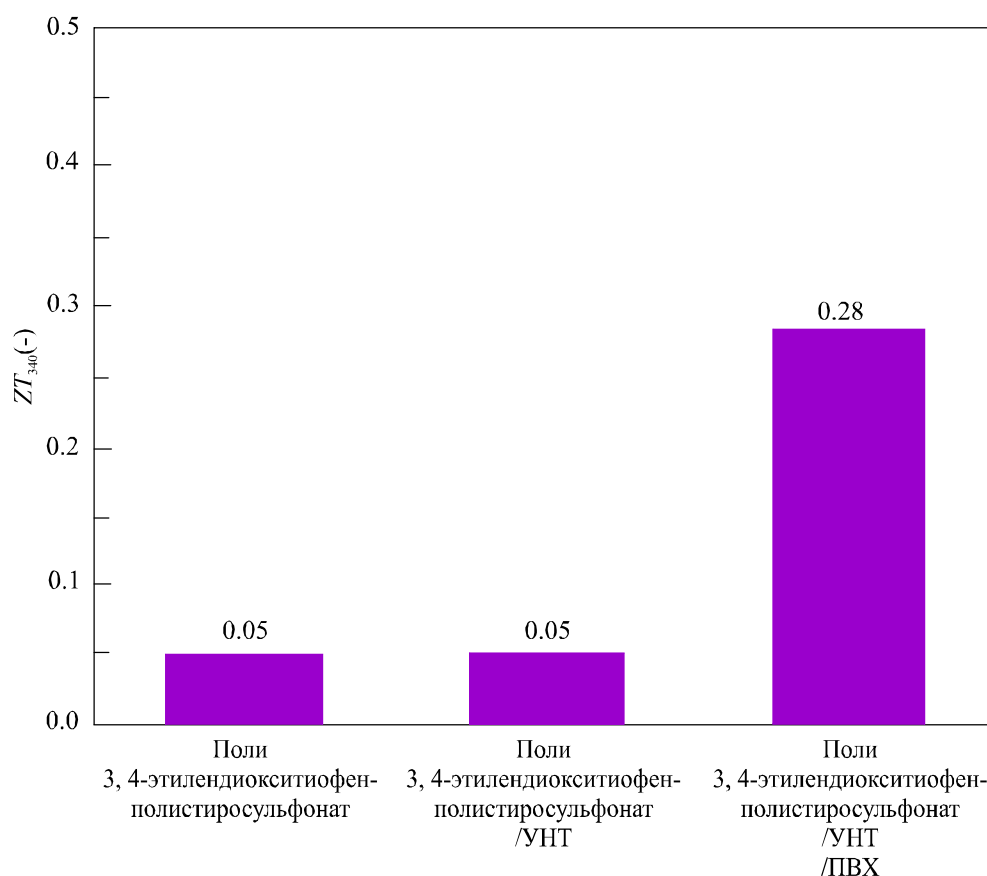


Рис. 13. Эффект улучшения ZT для тройной органической-неорганической гибридной системы по сравнению с системами УНТ и УНТ / ПВХ.

Экологически чистые термоэлектрические материалы считаются очень важными для реализации термоэлектрических устройств. В Японии проводится много научно-исследовательских работ по термоэлектрическим материалам, не содержащим теллур, таким как системы силицидов, оксидов, сульфидов, включая колузиты [9], гейслеровы соединения, в том числе полугейслеровы, скуттерудиты, клатраты, и т.д.

Для планомерного внедрения технологии термоэлектрического генерирования электроэнергии в практику, она должна заранее получить общественное признание. Это значит, что мы должны дать наглядное подтверждение контроля факторов риска для систем ТЭГЭЭ параллельно с разработкой науки о надежности [10] и техники безопасности в области ТЭГЭЭ [11]. Необходимо проанализировать угрозы и включить меры противодействия в систему ТЭГЭЭ еще на этапе демонстрационных испытаний. Для такого анализа выделяются три вида

угроз, обусловленных рабочей нагрузкой на подсистемы и компоненты, временной зависимостью в процессе эксплуатации и взаимосвязью компонентов трех основных подсистем: главной системой генерирования электроэнергии, системой передачи-преобразования энергии и системами источников и отвода тепла. На практике, на демонстрационной установке ТЭГЭЭ класса 10 кВт, использующей отработанное тепло от сталелитейного завода JFE, и блоках ТЭГЭЭ, установленных на каждой цементационной печи завода по производству зубчатых передач Awazu, Komatsu Ltd., установлено несколько резервных подблоков для защиты в первую очередь главной системы и систем ТЭГЭЭ от серьезных неполадок в работе. Важно подчеркнуть, что ориентированные на рынок системы ТЭГЭЭ должны постепенно подняться до потребительских требований.

В заключение необходимо отметить, что для практического применения новой технологии, такой как термоэлектричество, самым важным является человеческий фактор. Число членов Термоэлектрического общества Японии с каждым годом возрастает и в 2015 году составило более 500. В стране сохраняется высокий уровень исследований и разработок в области термоэлектричества. Например, в Международной конференции по органическому и гибриднему термоэлектричеству, состоявшейся в Киото в январе 2016 года, приняло участие около 150 человек.

Заключение

В исследованиях и разработках по улучшению ТЭ характеристик различных систем ТЭ материалов в последние годы наблюдался устойчивый прогресс. Ежегодно сообщается о заметных экспериментальных результатах для ТЭ материалов, таких как сульфиды, самособранные и искусственные наноструктурные ТЭ материалы, и гибридные органические ТЭ материалы.

С другой стороны, демонстрационные испытания систем ТЭГЭЭ, использующих модули *Bi-Te*, были связаны с энергосистемой для подтверждения ее надежности для систем класса 500 Вт и систем класса 10 кВт. Они показали перспективу реализации практического использования для системы ТЭГЭЭ системы класса свыше 100 кВт. Встроенный в ТЭГЭЭ беспроводной сенсорный узел разработан для практического применения как приложение ТЭГЭЭ в области аккумулялирования энергии.

Системы ТЭГЭЭ приблизились к современным требованиям практическим системам термоэлектрических генераторов. На этой стадии в высшей степени необходимы исследования надежности, техники безопасности и различные оценки. Можно полагать, что в ближайшем будущем технология ТЭГЭЭ может стать незаменимой базовой технологией для создания высокоэффективной энергетической системы в мире.

Благодарность

Авторы выражают сердечную признательность за добросовестное сотрудничество таким исследователям:

д-р Х. Обара (AIST), проф. К. Коумото (Нагойский университет), д-р М. Миками (AIST), проф. Х. Нишино (Нагойский технологический институт), г-н Н. Учияма (Atsumitec), д-р Х. Кайбе (KELK), д-р Х. Хачиума (KELK), д-р Т. Канно (Panasonic), проф. И. Хорита (Токийский технологический институт), г-н А. Ямамото (AIST), проф. Т. Иида (Токийский университет), и д-р Т. Накамура (Murata Manufacturing Co., Ltd.)

Литература

1. www8.cao.go.jp
2. www.thermat.jp
3. T. Kuroki, K. Kabeya, K. Makino, T. Kajihara, H. Kaibe, H. Hachiuma, H. Matsuno, and A. Fujibayashi, Thermoelectric Generation Using Waste Heat in Steel Works, *J. of Electronic Materials* 43 (6), 2405-2410 (2014).
4. Y. Saito, M. Inomata, T. Oono, T. Kannari, H. Hachiuma, R. Chu, Y. Horita, Solar Powered Desalination Using Thermoelectric Power Generation, *Proc. of the 3rd Joint SQU-JCCP Environment Symposium, Muscat, Oman, 2010*.
5. T. Nakamura, Fabrication of Multi-Layer Type Thermoelectric Modules using Multi-Layer Co-fired Ceramics (MLCC) Process and Application for Energy Harvesting, *Thermoelectric Power Generation System Technology*, 226-242, SST Press, 2013.
6. M. Ohta, Matured but Novel *Pb-Te* Thermoelectric Material: Marvelous Performance due to the Nano-Structure Technology, *J. of Kinzoku Materials Science & Technology*, 86(3), 213-220 (2016).
7. A. Yoshida, N. Toshima, Gold Nanoparticles and Gold Nanorod Embedded PEDOT:PSS Thin Films as Organic Thermoelectric Materials, *J. of Electronic Materials* 43(6), 1492-1497(2014).
8. N. Toshima, Thermoelectric Performance of Organic Materials Including Hybrid Systems, *J. of Kinzoku Materials Science & Technology* 86(3), 221-229 (2016).
9. K. Kim, K. Suekuni, H. Nishiata, M. Ohta, H. Tanaka, and T. Takabatake, High Thermoelectric Performance in Coulsites $Cu_{26-x}Zn_xV_2M_6S_{32}$ ($M = Ge, Sn$), *Extended Abstract of TSJ 2014*, 27, 2014.
10. K. Nagase, A. Yamamoto, Development of Durability Testing for Thermoelectric Power Generation Module, *J. of Kinzoku Materials Science & Technology*, 86 (3), 230-236 (2016).
11. T. Kajikawa, Present Status on Thermoelectric Power Generation Systems and their Safety, *J. of Japan Society*.

Поступила в редакцию 27.01.2016.